

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Électrotechnique

Option : Énergie renouvelable en Électrotechnique

Intitulé :

DIMENSIONNEMENT ET GESTION OPTIMALE DE L'ENERGIE
ELECTRIQUE D'UN MICRO-RESEAU EN UTILISANT LE LOGICIEL
HOMER : ETUDE DE LA REGION D'AIN SEFRA (WILLAYA DE
NAAMA)

Présenté par :

- **BENDAHO Soumia**
- **BENYAHIA Nassira**

Soutenu le : 30 /06/2021 devant le Jury :

M. BRAHIMI	Mohammed	MCB	Centre Universitaire Naâma	Président
M. HABCHI	Yassine	MCB	Centre Universitaire Naâma	Encadreur
M. BOUDDOU	Riyadh	Dr	Centre Universitaire Naâma	Co-Encadreur
M. BENOTMAN	Benamara	MAB	Centre Universitaire Naâma	Examineur
Nourddine				

Naama – Algérie - 2021

Remerciement

Avant tout, Je remercie ALLAH le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail dans des meilleures conditions.

*A la suite nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus chaleureux à notre encadreur **Dr, HABCHI Yassine** et le co-encadreur **Dr, BOUDDOU Riyadh**, pour avoir dirigé nos travaux de recherche, pour leurs disponibilités, leurs remarquables conseils professionnels et leurs commentaires éclairés ainsi que pour leur confiance qu'ils nous ont accordé tout au long de cette thèse.*

Nous tenons à remercier tous les professeurs du département de science et de la technologie.

Nous remercions également le directeur de la société SONALGAZ de wilaya du Naama, qui nous a aidés à obtenir des renseignements pour réaliser notre travail.

Enfin, nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



Dédicace :

Je dédie ce modeste travail à :


A Mes très chers parents, ma profonde gratitude et mon incontestable reconnaissance, pour tous les sacrifices que vous me contentés, toute la confiance que vous m'accordez et tout l'amour dont vous m'entourez ;

A Mes frère, et mes sœurs pour leurs soutiens et leurs amours ;

A toute ma famille, et mes amis ;

*A ma camarade **BENYAHIA Nassira** ;*

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

 **BENDAHO Soumia**



Dédicace :

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents ; Aucune dédicace ne saurait exprimer ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction ;

Mon chère frère Yassine et mes chères sœurs ;

Et tout ma famille BENYAHIA ;

A ma camarade BENDAHO Soumia ;

Nos encadreur Dr, HABCHI. Y et Dr, BOUDDO. R donné un éventail de conseils de ma part dans le plus grand sens de l'appréciation,

je vous souhaite le succès pour tous mes collègues, et a tous ceux qui m'ont aidé dans l'élaboration de ce travail.

✦ BENYAHIA Nassira



ملخص :

إن ندرة الوقود الأحفوري، وزيادة الطلب على الطاقة وانبعثات غازات الاحتباس الحراري هي الشواغل الرئيسية في العالم حالياً. ونتيجة لذلك، فإن تطوير الطاقات المتجددة والتحكم في الطلب على الطاقة، هي حلول مثيرة للاهتمام. وبالتالي، هناك حاجة إلى استراتيجيات ذكية جديدة، أولاً، لإدارة إنتاج الطاقة المحلي، وثانياً، للحفاظ على توازن العرض والطلب.

إن الهدف من العمل المنجز هو دراسة، في المحاكاة، نهج متعدد المعايير لإدارة الطاقة لشبكة صغيرة، على نطاق موقع مجهز بأنظمة الإنتاج والتخزين، عن طريق البحث على الحجم الأمثل لكل مكون باستخدام برنامج التحسين (هومر).

بالإضافة إلى ذلك، يتم اقتراح العديد من معايير الطاقة والاقتصاد لتقييم حجم هذه الأنظمة وأهمية الاستراتيجيات المقترحة.

تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أنه من الممكن الحصول على تكوينات مثيرة للاهتمام تسمح بتعزيز الاستهلاك الذاتي للطاقة وهكذا، تم تحقيق تطابق أفضل بين العرض والطلب.

الكلمات الأساسية : الشبكة الصغرى؛ والطاقة المتجددة؛ برمجيات هومر والتحسين الأمثل.

Résumé :

La raréfaction des ressources énergétiques fossiles, l'augmentation de la demande énergétique mondiale ainsi que la nécessité de réduire l'impact environnemental des émissions de gaz à effet de serre sont les principales préoccupations dans le monde actuellement. Pour y répondre, le développement des énergies renouvelables et la maîtrise de la demande, s'avèrent être des solutions intéressantes. Ainsi, des stratégies intelligentes tels que les micro-réseaux sont nécessaires afin de gérer la production locale, et de maintenir l'équilibre entre offre et demande.

Le but des travaux entrepris est d'étudier, en simulation, une approche multicritère de gestion énergétique d'un micro-réseau, à l'échelle d'un site équipé de systèmes de production et de stockage, en recherchant la taille optimale de chaque composant à l'aide d'un logiciel d'optimisation (HOMER). En outre, certains critères énergétiques et économiques sont proposés pour évaluer le dimensionnement de ces systèmes ainsi que la pertinence de la stratégie proposée.

Les résultats obtenus démontrent qu'il est possible d'obtenir des configurations intéressantes permettant de promouvoir l'autoconsommation d'énergie, ainsi, une meilleure adéquation entre offre et demande a pu être obtenue.

Mots clés : Micro-réseau ; Énergie renouvelable ; Logiciel HOMER et Optimisation.

Abstract :

The rarefaction of the fossil fuels, the increase in the demand for energy as well as the emissions of greenhouse gases are the main concerns in the world currently. As a result, developing renewable energies and controlling the demand for energy, are interesting solutions. So, new and intelligent strategies are needed in order, first, to manage the local production of energy, as well as its injection on the electricity grid, and, secondly, to maintain the equilibrium of supply and demand.

The aim of the present work is to develop then validate in simulation an intelligent and multicriteria approach for the management of the energy resources in a microgrid, i.e. a single-storey house equipped with production and storage systems, by searching on the optimal size of each component using the optimization program (HOMER). In addition, several energy and economic criteria have been defined in order to evaluate the proposed strategy.

The results highlight interesting configurations allowing energy self-consumption to be promoted, so, a better balance between supply and demand has been achieved.

Key words: *Microgrid; Renewable energy; HOMER software et Optimization.*



Sommaire

Sommaire :

Remerciement.

Dédicaces.

Résumé.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Liste des abréviations.

Introduction générale **1**

Chapitre I : Les énergies renouvelable.

I.1. Introduction..... **5**

I.2. Historique..... **5**

I.3. Définition des énergies renouvelables **7**

I.4. Type des énergies renouvelables **7**

I.4.1. Energie éolienne **7**

A. Description **7**

B. Principe de fonctionnement d'une éolienne **8**

C. Configuration et utilisation d'une station éolienne pour la production
d'électricité **9**

D. Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne **12**

I.4.2. Energie solaire **14**

I.4.2.1. Energie solaire thermique..... **14**

A. Description **14**

B. Principe de fonctionnement **14**

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire thermique..... **16**

I.4.2.2. Energie solaire photovoltaïque **17**

A. Description..... **17**

B. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... **18**

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque..... **20**

I.4.3. Energie hydraulique	20
A. Description	20
B. Principe de fonctionnement	21
C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique	22
I.4.4. Energie biomasse	23
A. Description	23
B. Principe de fonctionnement	23
C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse	24
I.4.5. Energie géothermique.....	25
A. Description.....	25
B. Principe de fonctionnement.....	26
C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique.....	27
I.5. Evolution des énergies renouvelables dans le monde.....	27
I.6. Les énergies renouvelables en Algérie	31
I.6.1. Statistiques de la capacité des énergies renouvelable en Algérie ...	31
I.6.2. Analyse de la situation énergétique en Algérie (2020)	32
I.6.3. Energie solaire en Algérie	33
I.6.3.1. Energie solaire thermique	33
I.6.3.2. Energie solaire photovoltaïque.....	34
I.6.4. Energie éolienne en Algérie	35
I.6.5. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie	35
I.6.5.1. Potentiel de l'énergie solaire.....	35
I.6.5.2. Potentiel de l'énergie éolienne.....	36
I.6.5.3. Potentiel de l'énergie géothermique.....	37
I.6.5.4. Potentiel de l'énergie la biomasse.....	38
I.6.5.5. Potentiel hydraulique	38
I.6.6. Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie	39
I.6.6.1. Développement des énergies renouvelables en Algérie	39

I.6.6.2. Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie	40
I.6.6.3. Développement de l'efficacité énergétique en Algérie	40
I.6.6.4. Programme de l'efficacité énergétique en Algérie	40
I.6.7. Développement des capacités industrielles en Algérie	43
I.6.7.1. Solaire photovoltaïque	43
I.6.7.2. Solaire thermique	44
I.6.7.3. Eolien	44
I.6.7.4. Isolation thermique	44
I.6.7.5. Eclairage performant	44
I.6.7.6. Chauffe-eau solaire	45
I.6.7.7. Equipement électroménagers	45
I.7. Obstacles au développement des énergies renouvelables en Algérie ..	45
I.7.1. Les obstacles politiques	45
I.7.2. Les obstacles technologiques	45
I.7.3. Les contraintes financières	46
I.8. Conclusion	46
Chapitre II : Dimensionnement et modélisation d'un micro réseau.	
II.1. Introduction	48
II.2. Définition d'un micro-réseau	48
II.3. Applications	52
II.3.1. MR isolés	52
II.3.2. MR îlotables	52
II.3.3. MR multi-énergies	52
II.4. Composants d'un micro-réseau	53
II.5. Principe de fonctionnement d'un MR	54
II.5.1. Mode connecté au réseau électrique	54
II.5.2. Transition vers le mode autonome	55
II.5.3. Mode déconnecté du réseau électrique	55

II.5.4. Mode reconnexion au réseau	55
II.6. Types de micro-réseaux	55
II.6.1. Micro-réseau connecté au bus CA	56
II.6.2. Micro-réseau connecté au Bus CC	57
II.6.3. Micro-réseau hybride CA/CC	58
II.7. Classification de micro-réseau	60
II.7.1. Les MR des zones commerciales, artisanales ou industrielles	60
II.7.2. Les Mrs de campus universitaire	60
II.7.3. Les MRs alimentant des zones isolées car faiblement ou non raccordées aux réseaux électriques ou temporairement coupées du réseau pour cause d'intempéries	61
II.7.4. Les écoquartiers	61
II.7.5. Les MRs de campus militaire ou hôpital	61
II.8. Technologies des Micro-réseaux	61
II.8.1. Outils de mesure	61
II.8.1.1. Capteurs	61
II.8.1.2. Compteurs intelligents	62
II.8.2. Systèmes de contrôle et de détection	63
II.8.3. Stockage d'énergie électrique	64
II.9. La modélisation du micro-réseau	65
II.9.1. Modélisation de la charge	66
II.9.2. Modélisation de la production décentralisée	66
II.9.2.1. Centrale photovoltaïque	69
II.9.2.2. Centrale éolienne	73
II.9.3. Modélisation du système de stockage	75
II.10. Les systèmes hybrides	78
II.10.1. Définition	78
II.10.2. Classification	80
II.10.3. Le principe de fonctionnement	81

II.10.4. Les structures du système hybride	81
II.10.4.1. Système hybride avec source d'énergie conventionnelle	82
II.10.4.1.1. Système photovoltaïque/source conventionnelle	82
II.10.4.1.2. Systèmes éolien/source conventionnelle	85
II.10.4.1.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel	86
II.10.4.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle	86
II.10.4.2.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage	86
II.10.4.2.2. Système hybride éolien/stockage	87
II.10.4.2.3. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	87
II.10.4.2.4. Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage ...	88
II.10.5. Dimensionnement d'un système hybride	88
II.10.5.1. Méthodes de dimensionnement	88
II.10.5.1.1. Les méthodes classiques	88
II.10.5.1.2. Les méthodes artificielles	90
II.10.5.1.3. Les logiciels de dimensionnement	91
II.10.6. Modélisation d'un système hybride photovoltaïque/éolien	91
II.10.6.1. Modélisation de la chaîne photovoltaïque	92
II.10.6.2. Modélisation de la chaîne éolienne	92
II.11. Avantages et obstacles des Micro-réseaux	92
II.12. Exploitation et maintenance des micro-réseaux	94
II.12.1. Transition entre les modes connectés au réseau et insulaire	94
II.12.2. Maintien de la stabilité du système de MR et fonctionnement synchrone	94
II.12.3. Défauts	95
II.12.4. Dépenses opérationnelles	96
II.12.5. Maintenance	96
II.13. Conclusion	98

Chapitre III : Simulation numérique et discussion des résultats.

III.1. Introduction	99
III.2. Site d'implantation	99
III.3. Données météorologiques de la région d'Ain Sefra	100
III.3.1. Donnée solaire du site	100
III.3.2. Température ambiante	101
III.3.3. La vitesse du vent	101
III.4. Topologie du réseau électrique	103
III.5. Présentation de l'outil de simulation (HOMER)	103
III.6. Configuration du système	106
III.6.1. Critères de choix	106
III.6.2. Etude du système	107
III.6.2.1. Profil de charge	107
III.6.2.2. Système hybride PV/Eolien/Diesel/Batterie connecté au réseau électrique	108
III.6.2.3. Caractéristiques techniques des composants utilisés	108
III.6.2.4. Système hybride PV/Eolien/Diesel/Batterie autonome	118
III.7. Conclusion	123
Conclusion générale	130

Annexes

Bibliographie

Liste des figures :

Chapitre I : Les énergies renouvelables.

Figure I.1 :	Chaîne de conversion de l'énergie éolienne	8
Figure I.2 :	Principe de fonctionnement d'une éolienne	9
Figure I.3 :	Eolienne à vitesse fixe	9
Figure I.4 :	Eolienne à vitesse variable à machine asynchrone à cage	11
Figure I.5 :	Eolienne à machine asynchrone à double alimentation (MADA)	12
Figure I.6 :	Types d'énergie solaire	14
Figure I.7 :	Principe du chauffe-eau solaire monobloc	15
Figure I.8 :	Principe du chauffe-eau solaire à éléments séparés	15
Figure I.9 :	Principe du chauffage de bâtiment par plancher solaire direct (PSD) ou hydro accumulation	16
Figure I.10 :	Principe du froid solaire	16
Figure I.11 :	Energie photovoltaïque	17
Figure I.12 :	Effet photovoltaïque	18
Figure I.13 :	Technologie des cellules photovoltaïque	19
Figure I.14 :	La chaîne de conversion de l'énergie hydraulique	21
Figure I.15 :	Centrales alimentées par une retenue d'eau	21
Figure I.16 :	Centrales au fil de l'eau	22
Figure I.17 :	Cycle de conversion de l'énergie biomasse	23
Figure I.18 :	Types de l'énergie géothermique	26
Figure I.19 :	Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique	27
Figure I.20 :	Evolution de la capacité des énergies renouvelables dans le monde (MW)	28
Figure I.21 :	Evolution de la capacité des énergies renouvelables par continent (MW) (2011-2020)	29
Figure I.22 :	Points forts par technologie (2020)	30
Figure I.23 :	Développement des énergies renouvelables en Algérie (2011 - 2020)	31
Figure I.24 :	Capacité des énergies renouvelables hors réseaux en Algérie (2011 - 2020)	32
Figure I.25 :	Potentiel de l'énergie solaire en Algérie	35
Figure I.26 :	Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu moyenne annuelle	36
Figure I.27 :	Potentiel solaire à concentration	36
Figure I.28 :	Potentiel de l'énergie éolienne	37
Figure I.29 :	Potentiel géothermique en Algérie	37

Figure I.30 :	Gradient géothermique	38
Figure I.31 :	Programme de l'efficacité énergétique	41

Chapitre II : Etude et modélisation des micro-réseaux électrique.

Figure II.1 :	Architecture d'un MR	49
Figure II.2 :	Part de la capacité des MR par Région, Quatrième trimestre 2017	50
Figure II.3 :	Capacité et dépenses annuelles des MR, scénario de base 2018-2027 .	50
Figure II.4 :	Composants d'un MR	54
Figure II.5 :	Structure d'un MRCA	56
Figure II.6 :	Structure d'un MRCC	57
Figure II.7 :	Structure d'un MRH	59
Figure II.8 :	Classification des principales technologies de stockage de l'énergie électrique dans le domaine des MR	65
Figure II.9 :	Modèle générale d'un MR	65
Figure II.10 :	Niveau de contrôle d'un MR	67
Figure II.11 :	Modèles à une diode des générateurs photovoltaïques	69
Figure II.12 :	Principales caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	70
Figure II.13 :	La structure type d'une micro-source PV	70
Figure II.14 :	Organigramme de l'algorithme MPPT de la P&O	72
Figure II.15 :	Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O	73
Figure II.16 :	Caractéristiques du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$	74
Figure II.17 :	Forme typique d'une courbe de puissance d'une éolienne	75
Figure II.18 :	Classification des batteries	76
Figure II.19 :	Modèle de batterie (Circuit équivalent de Thévenin)	77
Figure II.20 :	Architecture d'un système hybride	79
Figure II.21 :	Schéma général d'un système hybride	80
Figure II.22 :	Classification des systèmes hybrides	81
Figure II.23 :	Système hybride avec connexion série	83
Figure II.24 :	Système hybride à commutation	84
Figure II.25 :	Système hybride à connexion parallèle	85
Figure II.26 :	Illustration de la méthode de construction graphique	89
Figure II.27 :	Processus général d'exécution suivi dans le dimensionnement optimal des systèmes hybrides basés sur des méthodes artificielles	90

Chapitre III : Simulation numérique et discussion des résultats.

Figure III.1 :	Monographie de la wilaya de Nâama 2013	100
Figure III.2 :	Irradiation solaire à Ain Sefra	102
Figure III.3 :	Température ambiante à Ain Sefra	102

Figure III.4 :	vitesse du vent à Ain Sefra	102
Figure III.5 :	Réseau électrique 400Kv dans l'ouest de l'Algérie	103
Figure III.6 :	Interface du logiciel HOMER	103
Figure III.7 :	Opérations du HOMER	104
Figure III.8 :	Profil de charge journalière HOMER	107
Figure III.9 :	Profil de charge dans une année sur HOMER	108
Figure III.10 :	Architecture du système	108
Figure III.11 :	Solutions du système	110
Figure III.12 :	Production mensuel moyenne par élément	111
Figure III.13 :	Production des panneaux PV	112
Figure III.14 :	Production des éoliennes	113
Figure III.15 :	Energie achetée auprès du réseau	113
Figure III.16 :	Energie vendue au réseau	113
Figure III.17 :	Production mensuel moyenne par élément	114
Figure III.18 :	Etat de charge des batteries	115
Figure III.19 :	Production du convertisseur	116
Figure III.20 :	Quantité des émissions	117
Figure III.21 :	Architecture du système hybride	118
Figure III.22 :	Solution du système	118
Figure III.23 :	Production électrique par mois de chaque composant	119
Figure III.24 :	Etat de charge des batteries	120
Figure III.25 :	Production et consommation du carburant du générateur diesel	121
Figure III.26 :	Paramètres du générateur diesel	121
Figure III.27 :	Fonctionnement du convertisseur	122
Figure III.28 :	Valeurs des émissions	122

Liste des tableaux :

Chapitre I : Les énergies renouvelables.

Tableau I.1 : Part de chacune des ressources renouvelables primaires retenues ...	32
Tableau I.2 : Plan d'exécution du PNEREE révisé en 2015 (en MW)	33
Tableau I.3 : Les centrales Photovoltaïques et solaires thermiques mise en service	34
Tableau I.4 : Potentiel de l'énergie solaire en Algérie par région	35

Chapitre II : Etude et modélisation d'un micro-réseau électrique.

Tableau II.1 : Comparatif des fonctionnalités d'un réseau électrique classique et d'un réseau	51
Tableau II.2 : Applications des MR	53
Tableau II.3 : Les avantages et les inconvénients MRCA	57
Tableau II.4 : Les avantages et les inconvénients	58
Tableau II.5 : Les avantages et les inconvénients	60
Tableau II.6 : Options de maintenance	97

Chapitre III : Simulation numérique et discussion des résultats.

Tableau III.1 : Données générales de la commune d'Ain Sefra	100
Tableau III.2 : Données géographique du lieu d'implantation (Ain Safra)	100
Tableau III.3 : Données météorologiques de la région d'Ain Sefra	101
Tableau III.4 : Puissance active par heure	107
Tableau III.5 : Caractéristique techniques des composants utilisés	109
Tableau III.6 : Les coûts de composants	109
Tableau III.7 : Energie annuelle produite par chaque générateur	111
Tableau III.8 : Les coûts des composants du système hybride	112
Tableau III.9 : Données énergétiques du réseau	114
Tableau III.10 : Production électrique du chaque composant	114
Tableau III.11 : coûts du réseau en fonction de l'intégration des batteries	115
Tableau III.12 : Production du réseau par moi	116
Tableau III.13 : Production par élément	119
Tableau III.14 : L'excès de l'électricité du système	119
Tableau III.15 : Les coûts de chaque composant	120
Tableau III.16 : Comparaison des résultats de l'étude des deux systèmes	123

Liste des abréviations :

Abréviation:	Signification:	
	En français:	En anglais:
β	Beta	Beta
λ	Lambda	Lambda
€	Euro	Euro
ABC	Colonies d'Abeilles Artificielles	Artificial Bee Colony
CA	Courant Alternatif	Alternating Current
CC	Courant Continu	Direct Current
CdTe	Tellurure de Cadmium	Cadmium Telluride
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables	Center for the Development of Renewable Energy
CHP	Production Combinée de Chaleur et d'électricité	Combined Heat and Power
CIGS	Cuivre – Indium – Gallium – Sélénium	Copper - Indium - Gallium – Selenium
COE	Coût d'Énergie	Energy Cost
CSP	Énergie Solaire Concentrée	Concentrated Solar Power
DER	Ressources Énergétiques Distribuées	Distributed Energy Resource
DG	Générateur Distribué	Distributed Generator
DNO	Opérateur de Réseau de Distribution	Distribution Network Operator
DSM	Système de Gestion Distribué	Distribution Management System
ECS	Eau Chaude Sanitaire	Domestic Hot water
EMS	Système de Gestion d'Énergie	Energy Management System
EPS	Système de Puissance Électrique	Electric Power System
ER	Énergie Renouvelable	Renewable Energy
GN/C	Gaz Naturel Carburant	Natural Gas Fuel
GPL/C	Gaz de Pétrole Liquéfié Carburant	Liquefied Petroleum Gas Fuel
GW	Giga Watt	Giga Watt
HOMER	Modèle d'Optimisation Hybride Énergies Renouvelables	Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
INC Cond	Conductance Incrémentale	Incremental Conductance
IRENA	Agence International des Energies Renouvelables	International Renewable Energy Agency
KW	Kilo Watt	Kilo Watt
LC	Contrôleur Local	Local Controller
LCOE	Coût Nivelé De l'Électricité	Levelized Cost Of Electricity

Liste des abréviations

MADA	Machine Asynchrone à Double Alimentation	Asynchronous Machine with Dual Power Supply
MCC	Contrôleur Central Microréseau	Microgrid Central Controller
MENA	Moyen-Orient et Afrique du Nord	Middle East and North Africa
MLI	Modélisation de Largeur d'Impulsion	Pulse Width Modeling
MMCS	Systèmes de Surveillance et de Contrôle des Microréseaux	Microgrid Monitoring and Control System)
MPPT	Point de Puissance Maximale	Maximum Power Point Tracking
MR	Microréseau	Microgrid
MRCA	Microréseau Courant Alternatif	Alternating Current Microgrid
MRCC	Microréseau Courant Continu	Direct Current Microgrid
MRH	Microréseau Hybrides	Hybrid Microgrid
MTEP	Millions de Tonnes Equivalent Pétrole	Millions of Tons of Oil Equivalent
MW	Mega Watt	Mega Watt
MW_C	Mega Watt Crête	Mega Watt Cret
N	Négative	Negative
O&M	Opération et Maintenance	Operation and Maintenance
P	Positive	Positive
PCC	Point de Couplage Commun	Point of Common Coupling
PME	Petit Moyenne Entreprise	Small Medium Enterprise
PNEREE	Programme National de Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique	National Program for the Development of Renewable Energy and Energy Efficiency
P&O	Perturbation Et d'Observation	Perturb And Observe
PSD	Plancher Solaire Direct	Direct Solar Floor
PSO	Optimisation des Essaims de Particules	Particle Swarm Optimization
PV	Photovoltaïque	Photovoltaic
RAPSIM	Simulateur d'Alimentation de Zone Éloignée	Remote Area Power Supply Simulator
SOC	Etat De la Charge	State Of Charge
SOH	Etat De Santé	State Of Health
STATCOM	Compensateurs Statiques	Static Compensator
TEP	Tonne Equivalent de Pétrole	Ton Of Oil Equivalent
V	Volt	Volt



Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale :

Les systèmes électriques de la plupart des pays développés subissent des changements majeurs. Ces changements sont le résultat de la libéralisation du marché de l'électricité et de l'augmentation des énergies renouvelables dans la structure énergétique.

La topologie du système électrique n'a pas changé depuis sa création au début du XX^{ème} siècle. A cette époque, une architecture centralisée a été mise en place : l'électricité est produite par des centrales électriques de très haute puissance, acheminée entre les régions via des réseaux de très grande, et distribuée aux consommateurs via des réseaux basse tension.

Cette architecture centralisée permet de répondre au mieux aux contraintes du moment, mais aussi d'assurer un développement rapide du réseau et une bonne qualité d'approvisionnement. Par conséquent, la plupart des pays ont des systèmes électriques assez centralisés et verticalement intégrés. [1]

Cependant, ces dernières années, afin de parvenir à une large libéralisation du marché de l'électricité et augmenter la part des producteurs basés sur les énergies renouvelables, tout en maintenant la stabilité de la qualité de l'électricité, ce système a commencé à être remis en cause consommateur. [2]

En raison de plusieurs problèmes rencontrés par le réseau électrique actuel (consommation accrue, pénurie de pétrole, réchauffement climatique, pollution de l'environnement, faible efficacité énergétique, etc.), une nouvelle tendance de production a émergé, appelée production d'électricité décentralisée.

Pour cela, les pays doivent revoir leurs politiques énergétiques tout en utilisant un mix énergétique basé sur les énergies renouvelables. Cette dernière est gratuite, fournie par le soleil, le vent, la géothermie, les cascades, les marées ou la croissance des plantes. [3]

De plus, ils ne produisent quasiment pas de déchets ni d'émissions polluantes. Elle contribue également à lutter contre l'effet de serre et les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, favorise la gestion rationnelle des ressources locales et crée de nouvelles opportunités d'emploi.

Récemment, nous avons vu que pour des pays comme l'Algérie, l'utilisation des énergies renouvelables est impérative. C'est aussi grâce à la combinaison de l'initiative et de la sagesse, ou l'Algérie a entamé une nouvelle ère de l'énergie durable, car c'est le pays le plus ensoleillé de tout le bassin méditerranéen, avec un potentiel estimé de 169 TWh/m²/an constitué comme suit : régions côtières avec 1700 TWh, hauts plateaux avec 1900 TWh et le Sahara avec 2 650 TWh.

Compte tenu de la situation géographique de l'Algérie, l'Algérie lance un ambitieux plan de développement des énergies renouvelables pour amorcer une dynamique énergétique verte. [4] L'Algérie dispose d'un potentiel en énergie solaire au sud, et plusieurs endroits au nord ont un potentiel éolien et géothermique, ainsi qu'un potentiel de biomasse et d'eau.

Enfin, l'Algérie lance un plan de mise en place de centrales électriques à base d'énergies renouvelables d'ici 2030, dont 37% de la capacité installée et 27% de la production électrique pour la consommation nationale proviendront des énergies renouvelables. [5] La rentabilité de l'utilisation des énergies renouvelables dépend directement de la maîtrise de leur intégration au réseau. Si les conditions du marché le permettent, réservez le droit d'exporter des options comme objectif stratégique.

En peut résoudre le problème de l'électricité variable et dangereuse générée par les énergies renouvelables en couplant des sources d'approvisionnement et en formant un système dit hybride. Le système hybride d'énergie renouvelable est un système d'alimentation qui comprend plusieurs sources d'énergie, dont au moins une est une source d'énergie renouvelable. [6]

Le système hybride peut comprendre des dispositifs de stockage. Dans une perspective plus globale, le système énergétique d'un pays peut être considéré comme un système hybride. L'extension du réseau à ces zones nécessitera des coûts financiers élevés. Ce système hybride est aujourd'hui le moyen le plus efficace de récupérer le biogaz pour la production d'électricité.

Un autre avantage de ce système est qu'il produit très peu de polluants atmosphériques par rapport aux méthodes traditionnelles de cogénération. Le rendement est un facteur essentiel dans les projets de méthanisation.

Pour d'assurer une meilleure autonomie du système, un stockage électrochimique a été envisagé. Dans le même temps, considérant que l'équilibre entre l'énergie électrique générée par le système d'alimentation hybride et la demande d'énergie n'est pas toujours suffisant, ce manque d'énergie sera compensé par l'introduction d'un stockage tampon électrochimique dans le système. [7]

Une solution prometteuse au problème de l'intégration des énergies renouvelables dans les zones rurales est généralement l'éloignement du réseau principal et l'accès facile aux énergies renouvelables, ce qui permet également de développer et de consommer des ressources localement. A proximité se trouve un micro-réseau.

C'est dans un micro-réseau hybride typique que l'énergie électrique générée sous des formes continues et alternées impose des contraintes supplémentaires aux concepteurs, mais

elle apporte également des perspectives de recherche, et les résultats peuvent être utilisés dans de nombreux domaines connexes. Un micro-réseau est un réseau intelligent ou une partie d'un réseau intelligent. Ce MR comprend des consommateurs et des micro-sources basées sur les énergies renouvelables. [8] Et des centrales ou microcentrales d'accomplissement d'énergie, qui peuvent asservir des ressources primaires renouvelables locales, ou d'autres richesses importées pareilles que le diésel.

Une distribution et éventuellement de transport sur de courtes distances de l'assiduité produite. Des dispositifs d'électronique de puissance destinés à la conversion et au transfert de l'énergie électrique d'un niveau du système à l'autre. Et un ou plusieurs moyens de stockage dépendance de l'énergie produite, nécessaire afin de fournir de l'énergie lors des périodes de forte demande.

Des moyens de stabilisation de l'électricité du micro-réseau, pouvant être des compensateurs statiques ; ou davantage récemment, l'maniement de systèmes de stockages à batterie électrochimique pour appareil de compensation de l'énergie active et réactive et des consommateurs locaux, qui peuvent vertu une alimentation en courant alternatif (AC) ou continu (DC), dont la répartition pendant le micro- réseau et les exigences d'adjective sont des contraintes majeures dans lequel les opérateurs. Optionnellement d'un accommodement de connexion et de déconnexion du réseau électrique bonifié de replète puissance. [9]

Donc, Le développement de micro-réseaux est effroyablement prometteur pour l'industrie de l'énergie électrique en réfléchie de quelques avantages exacts que la pacification du réchauffement atmosphérique et de l'insalubrité environnementale, l'bouleversement de la fiabilité, de la désignation et de la puissance, la paix des pertes et par conséquence l'inflation du rendement.

Dans notre travail, nous proposons l'étude du dimensionnement et gestion optimale de l'énergie électrique d'un micro-réseau pour alimenter la région Ain Sefra dans la willaya - Naama- et nous subdivisons le plan de travail en trois chapitres :

Le premier chapitre est nous permet d'entrer dans l'univers des énergies renouvelables : Nous présentons tout d'abord, des généralités sur les énergies renouvelables ainsi que développement des énergies renouvelables dans le monde et dans Algérie une perspective de l'énergie renouvelable en Algérie à travers l'objectif la stratégie poursuivie par l'Algérie dans le domaine des énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre, nous intéressons au dimensionnement la modélisation d'un micro-réseau électrique et on nous a donné un état complet sur les systèmes hybrides.

Le troisième chapitre nous avons proposé les solutions trouvées au problème (simulation, réalisation) pour modéliser et dimensionner un système électrique basé sur un micro-réseau pour alimenter avec une gestion économique optimale de l'énergie pendant 24 heures après avoir pris en compte la variation de la consommation totale la région Ain Sefra nous présentons le logiciel HOMER Finalement nous donnée discussion détaillée des résultats.



Chapitre I

Les énergies renouvelables

I.1. Introduction :

À l'échelle mondiale, 1.4 milliard de personnes vivent sans électricité et de nombreuses personnes dans le monde sont confrontées à des coupures de courant récurrentes. La croissance de la demande d'électricité, ainsi que les préoccupations liées au changement climatique et à l'adéquation d'autres technologies ont suscité l'intérêt pour les technologies d'énergie renouvelable. L'utilisation efficace de diverses sources d'énergie renouvelables peut ouvrir la voie au développement durable. [10]

En conséquence, et grâce l'épuisement des combustibles fossiles et de leurs conséquences négatives sur l'environnement, les sources d'énergie renouvelables semblent être le choix futur pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux à long terme. [11]

Et, avec le lancement d'un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables (ER) et d'efficacité énergétique, l'Algérie a développé une dynamique énergétique verte basée sur une stratégie centrée sur la valorisation des ressources non renouvelables et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer le pays à l'avenir. [12]

Ce premier chapitre est consacré à une brève présentation des énergies renouvelables ainsi que du développement de ces énergies dans le monde et dans notre pays, notamment à travers la présentation du potentiel des énergies renouvelables en Algérie, le programme à court et à long terme, les objectifs auxquels aspire notre pays dans le domaine des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique et quels obstacles empêchent la réalisation de ces objectifs.

I.2. Historique :

Les seules sources d'énergie disponibles à l'époque paléolithique étaient la puissance musculaire humaine et l'énergie à base de biomasse qui pouvaient être exploitées par le feu ; cependant, de nombreux progrès ont permis d'exploiter ces énergies avec une efficacité croissante (inventions d'outils plus performantes).

L'avancement le plus significatif a été le développement de la traction animale, qui est venu plus tard que la domestication des animaux. Au cours du quatrième millénaire avant notre ère, on pense que les humains ont commencé à chasser les animaux avec des arches ou des véhicules à roues. L'invention de l'avion a été un pas en avant significatif dans la mondialisation des échanges commerciaux.

Du XI^e siècle au XIII^e siècle : L'introduction progressive des moulins à eau et à vent est qualifiée par Fernand Braudel de "première révolution mécanique." Cependant, dans une économie avec une énergie insuffisante, ils représentent une augmentation significative de la

puissance. Le moulin à eau, qui est plus ancien, a une valeur beaucoup plus grande que l'éolienne. Il ne dépend pas des irrégularités du vent, mais plutôt de l'eau, qui est généralement moins imprévisible. En raison de son âge et de l'abondance des rivières et des ruisseaux, il est plus largement diffusé.

À la fin du XVIII^e siècle : La quasi-totalité des besoins énergétiques de l'humanité étaient déjà assurés par les énergies renouvelables à l'époque de la révolution industrielle.

Dans une étude sur la distribution de la consommation d'énergie, Fernand Braudel estime que la traction animale représente plus de la moitié de la consommation totale, suivie du bois à environ 25%, de l'eau à 10 à 15%, de l'énergie humaine à 5% et du vent à un peu plus de 1% pour le commerce maritime.

L'invention de la machine à vapeur, suivie du moteur diesel, a précipité la disparition des turbines à eau et de l'énergie éolienne au XIX^e siècle ; les turbines à eau et les éoliennes ont disparu, remplacées par des minoteries industrielles.

L'hydroélectricité, apparue en Suisse, en Italie, en France et aux États-Unis à la fin du XIX^e siècle, a donné un nouveau souffle à l'énergie hydraulique. Au XIX^e siècle, François de Larderel popularise l'utilisation de la géothermie en Italie.

Les premiers chauffe-eaux individuels à chauffage solaire apparaissent en Californie dans les années 1910. La première centrale géothermique est construite à Larderello en 1911.

Au tournant du siècle, l'énergie éolienne était principalement utilisée pour la navigation par bateaux de plaisance et la lutte contre les inondations.

Puis, dans les années 1990, les éoliennes réapparaissent, aidées par des technologies aéronautiques plus avancées ; leur développement s'accélère dans les années 1990.

Le développement de l'énergie solaire thermique et photovoltaïque a commencé au début des années 2000.

Du fait des avancées technologiques et des économies d'échelle liées à l'augmentation des volumes installés, les coûts des filières de production d'énergie renouvelable, encore émergentes au début des années 2000, évoluent rapidement.

Depuis la fin du XX^e siècle, en réponse au début de la raréfaction des pétrodollars, aux effets négatifs des énergies carbonées sur le climat et la santé, ainsi qu'aux catastrophes nucléaires de tchernobyl et de fukushima, et aux débats sur le traitement des déchets nucléaires, un virage mondial vers les énergies renouvelables a été observé.

En 2017, les énergies renouvelables représentaient 18,1% de la consommation totale d'énergie, avec 7,5% de la biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 10,6% des

énergies renouvelables "modernes" : 4,2% de la chaleur produite par les énergies thermiques renouvelables (biomasse, géothermie, solaire), et 3,6% de l'hydroélectricité.

En 2018, la part mondiale de l'électricité était de 26,2%, l'hydroélectricité représentant la plus grande part (15,8%). [13]

I.3. Définition des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie qui proviennent d'une source renouvelable, c'est-à-dire une source qui peut être reconstituée suffisamment rapidement pour que l'utilisation actuelle n'ait aucun effet sur la disponibilité future. Elles sont des énergies de flux et ils se régénèrent en continu (les flux solaires, le vent, etc.). [14]

Les énergies renouvelables ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité telle que le bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent...etc.

Malheureusement, ces énergies ont été délaissées et marginalisées et au profit d'autres sources d'énergies que l'on pensait à l'époque plus intéressantes.

Ce n'est que récemment, en raison de la pollution atmosphérique, du changement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre, des risques nucléaires et des limites de ressources (pétrole, gaz, carbone et uranium), qu'il y a eu prise de conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement est absolument nécessaire. [15]

I.4. Type des énergies renouvelables :

I.4.1. Energie éolienne :

A. Description :

La ressource éolienne est provenue du mouvement des masses d'air, qui est dû à l'ensoleillement de la Terre. Une différence de pression est créée par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement des autres, et les masses d'air sont constamment en mouvement. [16]

C'est l'énergie qui permet de produit l'électricité à partir d'éoliennes à travers la force du vent par l'utilisation d'un aérogénérateur. [17]

L'aérogénérateur, également connu sous le nom d'éolienne, convertit une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique.

• Au niveau du générateur, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, qui est ensuite transmise au réseau électrique. La figure I.1 est représentée chaîne de conversion de l'énergie éolienne. [18]

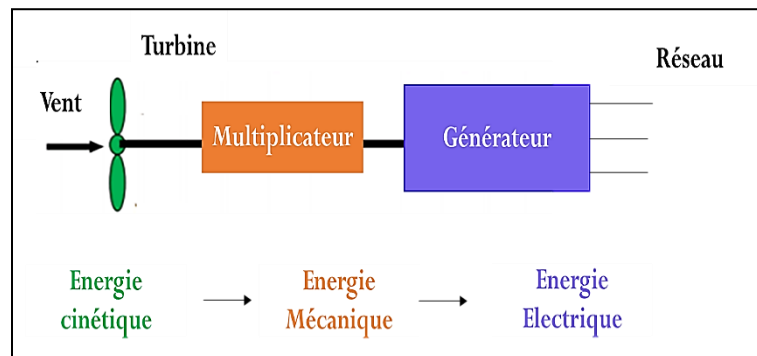


Figure I.1 : Chaîne de conversion de l'énergie éolienne. [19]

B. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

❖ La transformation de l'énergie par les pales :

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

❖ L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :

Les pâles tournent à une vitesse lente, environ 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur.

❖ La production d'électricité par le générateur :

Le multiplicateur transmet l'énergie mécanique qui sera transformée ensuite en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité.

❖ Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur :

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée par un transformateur. L'électricité est alors acheminée

jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis acheminée aux consommateurs comme le montre figure I.2. [20]

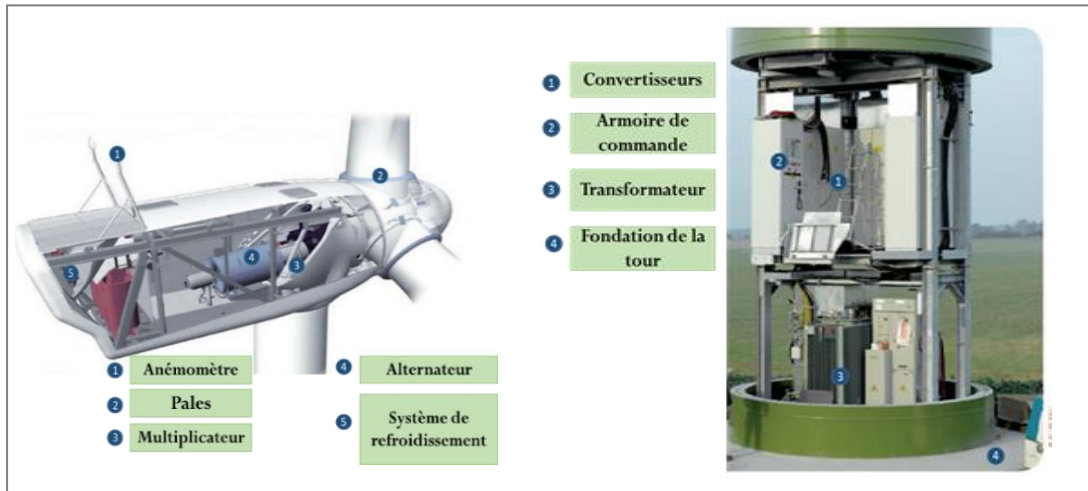


Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une éolienne. [21]

C. Configuration et utilisation d'une station éolienne pour la production d'électricité :

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

C.1. Fonctionnement à vitesse fixe :

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement couplée sur le réseau électrique. La vitesse de cette machine est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). La figure I.3 montre une éolienne fonctionne à vitesse fixe [22]

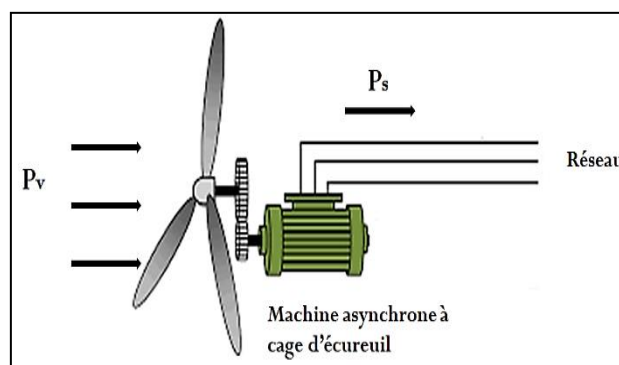


Figure I.3 : Eolienne à vitesse fixe. [23]

✚ Parmi ses avantages :

- Elles possèdent un système électrique plus simple.
- Très grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Ne nécessite pas un système électronique de commande.
- Moins cher. [24]

C.2. Fonctionnement à vitesse variable :

Elle est composée d'une turbine, un multiplicateur, un générateur, un convertisseur de puissance. La partie électrique de l'éolienne, en général, consiste en un générateur électrique synchrone ou asynchrone. [25]

Les machines synchrones : Elles sont utilisées dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Par rapport aux générateurs à induction et pour la même taille, les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 KW à 2 MW sont bien plus chers. [24]

Le deuxième type est la machine asynchrone : Elle peut être alimentée par le stator (machine à cage) ou par le stator et le rotor à la fois (machine à rotor bobiné).

Et contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

Ces génératrices asynchrones sont largement répandues pour la production de l'énergie électrique d'origine éolienne, particulièrement dans des régions isolées.

Le générateur asynchrone en mode autonome ne génère pas sa propre énergie d'excitation. Pour cette raison, il faudra lui apporter cette énergie par une batterie de condensateurs connectés en parallèle au bobinage statorique ou en utilisant un convertisseur (onduleur/redresseur commandé par **MLI**) et une capacité connectée au côté continu du convertisseur. L'objectif du système de commande est de maintenir la tension du bus continu à une valeur constante en variant le flux dans la génératrice asynchrone quand la vitesse de rotor est variable et aussi de maintenir la tension du bus continu à une valeur constante et le flux rotorique dans la génératrice asynchrone quand la charge est variable. [25], [26], [27]

✚ Les principaux avantages des éoliennes à vitesses variables comparées aux éoliennes à vitesses fixes sont les suivants :

- Une puissance électrique d'une meilleure qualité.

- Augmentation du rendement énergétique. [24]
- Elles nécessitent un système d'orientation des pales simplifié. En effet, la possibilité de contrôler la vitesse de générateur via le couple électromagnétique permet de réduire le rôle du système d'orientation des pales, qui interviendra essentiellement pour limiter la vitesse de la turbine et la puissance générée en présence de vitesse de vent élevés.
 - En conséquence, pour de faibles vitesses de vent, l'angle d'orientation des pales devient fixe.
 - Le bruit généré par la turbine est réduit. [28]
 - Elles permettent une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique. [29]

La plupart des génératrices utilisées par les éoliennes sont des génératrices asynchrones triphasées parce qu'elles sont robustes, leur coût est faible et ont une simplicité mécanique. [30]

❖ **Eolienne à machine asynchrone à cage :**

L'éolienne dans cette configuration entraîne une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé au circuit statorique. Ce type de la machine est illustre dans la figure I.4.

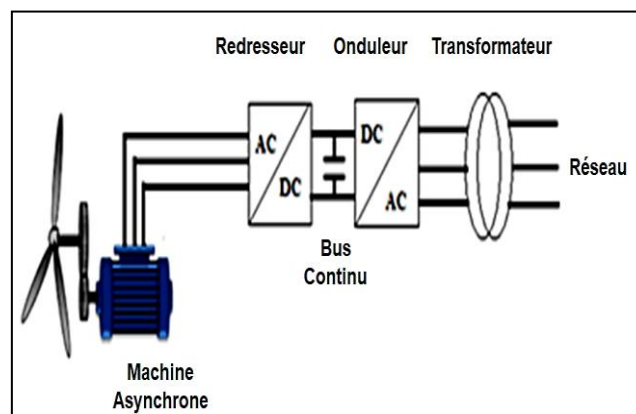


Figure I.4 : Eolienne à vitesse variable à machine asynchrone à cage. [31]

Le redresseur assure des tensions et des fréquences variables à la sortie du générateur ce qui permet de conduire la vitesse de l'éolienne. Il reçoit ses consignes de tension et de fréquence du processus de la commande. L'onduleur est contrôlé pour garder constante la tension de bus continu. Les pales de la turbine éolienne sont orientables (commandable) pour permettre de limiter la puissance électrique produite constante et égale à sa valeur nominale lors des vitesses du vent très importantes. [25]

❖ Eolienne à machine asynchrone à double alimentation :

Dans la figure I.5, la conception stator de la machine asynchrone est connecté directement au réseau. Le convertisseur de puissance se trouve au circuit rotorique. Le redresseur alimente les enroulements rotoriques par les tensions et la fréquence de consigne qu'il reçoit de la procédure de commande. L'onduleur est contrôlé d'une manière à garder constante la tension du bus continu. Du fait que la puissance transmise par le circuit rotor est faible par rapport à la puissance transmise par le circuit stator dans la première configuration, cette configuration présente l'avantage d'économiser de l'argent sur les convertisseurs de puissance. [25]

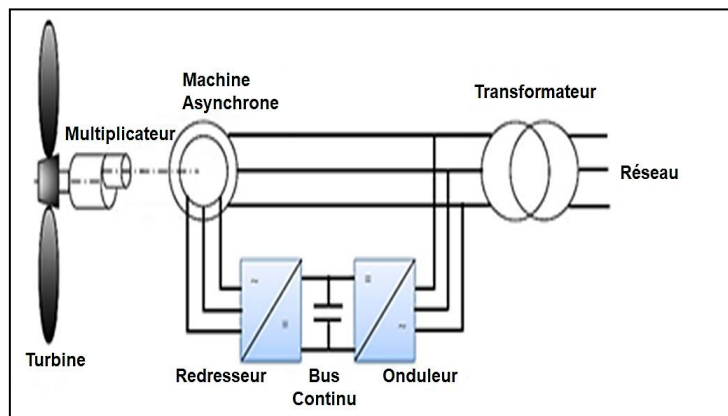


Figure I.5 : Eolienne à machine asynchrone à double alimentation (MADA). [23]

C.3. Autres machines :

D'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées notamment dans les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu les ont une bonne marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une bonne capacité de surcharge, mais elles sont coûteuses et lourdes. Les générateurs à réluctance variable sont des machines mécaniquement durables avec un bon rendement à toutes les vitesses et une large gamme de variations de vitesse de rotation. Leur contrôle est simple, mais la puissance produite par ces éoliennes est souvent faible.

Ce type de machine pourrait être un candidat pour les futures éoliennes. [22]

D. Les avantages et les inconvénients d'énergie éolienne :

✚ Avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches.

- Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles et se démontent très facilement.
- La période de haute productivité se situe en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande en électricité est plus forte.
- Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. [23]
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours. [32]
- Énergie propre ; non polluante.
- L'industrie éolienne a un potentiel d'emploi important au niveau de la fabrication et de l'installation. Outre les avantages économiques et environnementaux, les énergies renouvelables revêtent un intérêt particulier car elles peuvent contribuer à la diversification et à l'indépendance énergétique d'un pays. [33]
- Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires. [34]

✚ Inconvénients :

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients qu'il faut citer :

- Le bruit aérodynamique lié à la vitesse de rotation du rotor.
- L'impact sur les parcours migratoires des oiseaux et l'impact visuel.
- La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production. [23]
- Son insertion dans les réseaux électriques entraîne des problèmes et contraintes spécifiques qui doivent être pris en compte par les opérateurs de réseaux. En effet, tant que ce type de production reste marginal, les contraintes sont limitées. Aussi pendant longtemps les parcs éoliens n'ont souvent eu pour seules « contraintes » que de produire lorsqu'il était possible de produire et de ne pas dégrader la qualité de tension sur les réseaux. [33]

I.4.2. Energie solaire :

Le soleil est la première et la plus importante source d'énergie renouvelable. Pour exploiter l'énergie solaire, des panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques peuvent être utilisés. La figure I.6 représenté les deux types de système solaire. [35]

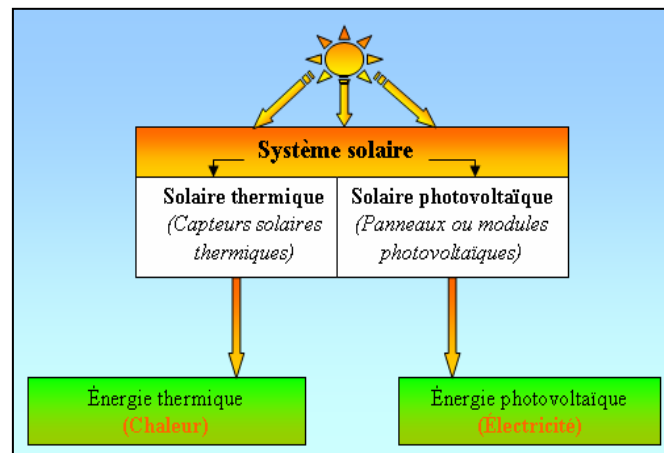


Figure I.6 : Types d'énergie solaire. [36]

I.4.2.1. Energie solaire thermique :

A. Description :

Le solaire thermique consiste à utiliser des capteurs solaires afin de capter l'énergie du rayonnement solaire à l'intérieur d'un liquide, le plus souvent est l'eau. Nous pouvons alors utiliser l'énergie récupérée dans la production d'ECS, le chauffage des piscines et des maisons, et le séchage de céréales. [37]

B. Principe de fonctionnement :

Il existe trois utilisations générales de l'énergie thermique, chaque utilisation nécessitant une gamme de température à atteindre :

❖ Utilisation 1 : Chauffage de l'eau sanitaire :

- **Le chauffe-eau solaire monobloc :** Les capteurs sont séparés du système de stockage. La circulation est naturelle : une différence de température est tout ce qui est nécessaire pour la circulation du fluide (thermosiphon). Cette technologie est particulièrement bien adaptée aux climats plus doux. La figure I.7 donnée le principe du chauffe-eau solaire monobloc. [38]

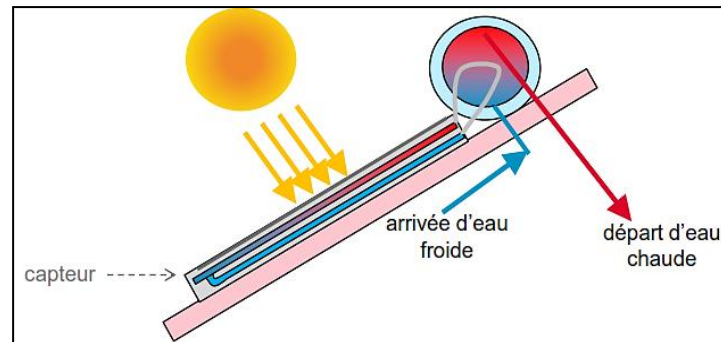


Figure I.7 : Principe du chauffe-eau solaire monobloc. [39]

- **Chauffe-eau à éléments séparés :**

Les capteurs sont toujours au plafond, mais cette fois, le composant de stockage a été déconnecté et déplacé à l'intérieur du bâtiment.

En cas de risque de gel, cette technologie est nécessaire : un antigel est fréquemment ajouté au fluide caloporteur, et le ballon est placé à l'intérieur de la résidence.

Un circulateur et un régulateur sont alors utilisés pour forcer l'eau à circuler. Pour les installations collectives, l'installation peut être personnalisée pour inclure de nombreux éléments de stockage ou une zone de stockage centralisée, ce principe est expliqué dans la figure I.8. [38]

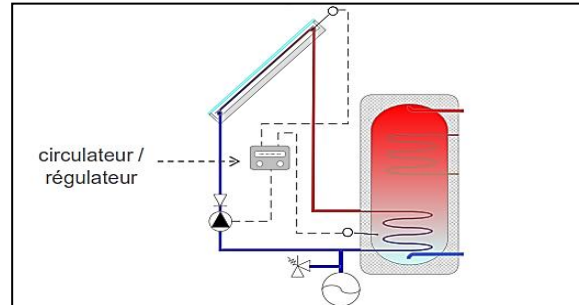


Figure I.8 : Principe du chauffe-eau solaire à éléments séparés. [39]

- ❖ **Utilisation 2 : Chauffage de bâtiment :**

La chaleur collectée, portée par le fluide caloporteur, va circuler à travers le bâtiment et diffuser peu à peu sa chaleur comme montre la figure I.9.

- **Le plancher solaire direct (PSD) :**

Un réseau de tuyaux entoure la planche et disperse progressivement la chaleur dans toute la structure. Un réseau de distribution peut également être connecté à une chaudière. Le fluide caloporteur peut alors être stocké.

• **L'hydro accumulation :**

L'énergie solaire est stockée au fur et à mesure qu'elle arrive dans un ballon de stockage et peut être utilisée pour le chauffage de l'eau ou le chauffage domestique. [38]

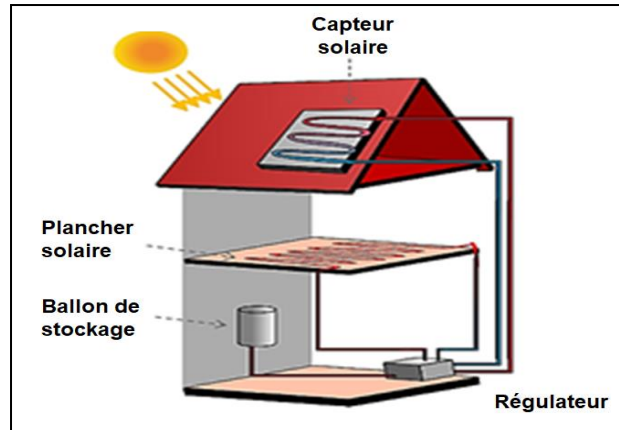


Figure I.9 : Principe du chauffage de bâtiment par plancher solaire direct (PSD) ou hydro accumulation. [39]

❖ **Utilisation 3 : Climatisation intérieure, ou « froid solaire » :**

La chaleur peut être utilisée de manière indirecte pour créer du froid. Le terme pour cela est " froid solaire." qui montré dans la figure I.10.

Les capteurs solaires fournissent de l'énergie sous forme de chaleur, tandis qu'une pompe thermique assure la compression.[38]

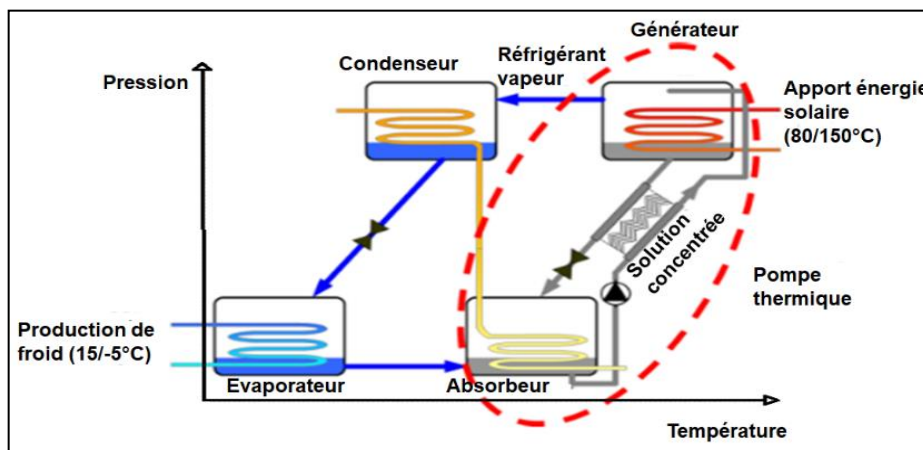


Figure I.10 : Principe du froid solaire. [39]

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire thermique :

✚ **Avantages :**

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante.
- L'énergie est propre et ne dégage pas de gaz à effet de serre.

- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes.
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.

✚ Inconvénients :

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc d'un système de chauffage d'appoint.
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.

I.4.2.2. Energie solaire photovoltaïque :

A. Description :

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable qui génère de l'électricité en convertissant le rayonnement solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Plusieurs de ces cellules sont reliées entre elles sur un panneau photovoltaïque.

Ces panneaux peuvent être utilisés individuellement pour charger une batterie et répondre aux besoins individuels en électricité, ou à plus grande échelle pour alimenter des centrales photovoltaïques qui alimentent le réseau de distribution public. La figure I.11 suivante est précisée l'énergie solaire PV. [37]

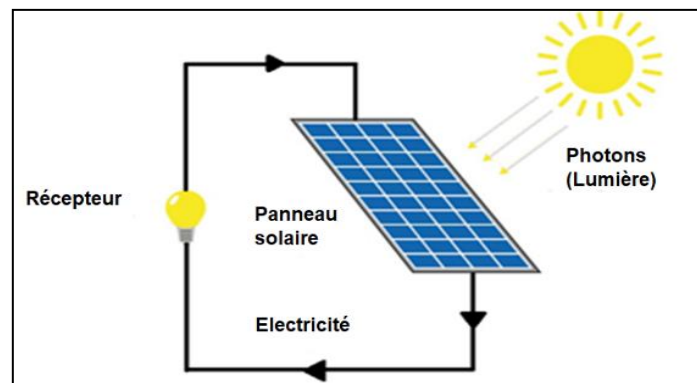


Figure I.11 : Energie photovoltaïque. [40]

B. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

B.1. L'effet photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque, qui implique l'établissement d'une force électromotrice lorsque la surface de la cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0,3 et 0,7 V en fonction du matériau et de son emplacement, ainsi que de la température de la cellule.

Une cellule **PV** est constituée de deux couches de silicium, l'une dopée **P** (dopée à l'alésage) et l'autre dopée **N** (dopée au Phosphore), ce qui conduit à une jonction **PN** avec une barrière de potentiel.

Lorsque les photons sont absorbés par des semi-conducteurs, leur énergie est transférée aux atomes de la jonction **PN**, ce qui entraîne une différence de potentiel entre les deux couches due aux électrons (charges **N**) et aux trous (charges **P**). Ce l'effet est illustré dans la figure I.12.

Cette différence de potentiel peut être mesurée en regardant les connexions entre les brins positifs et négatifs de la cellule. [41]

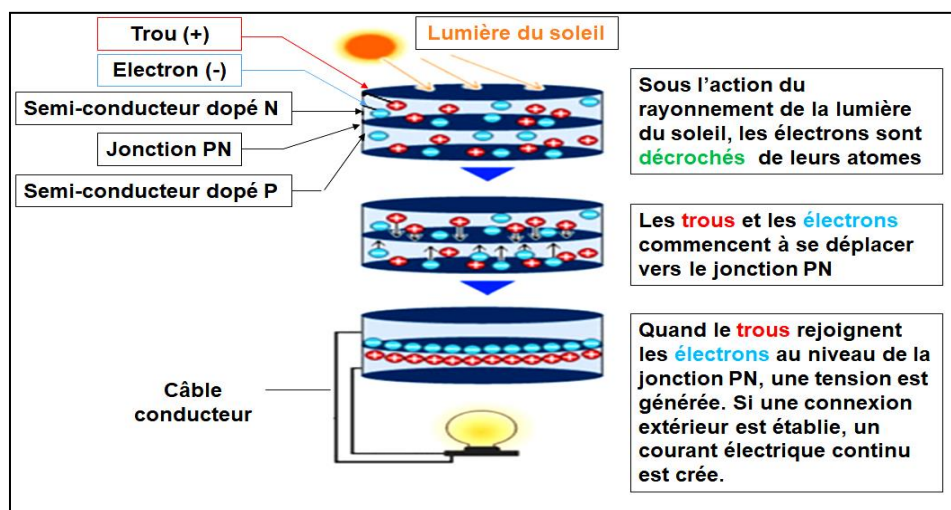


Figure I.12 : Effet photovoltaïque. [42]

B.2. Différentes technologies :

Actuellement, il existe trois types de cellules photovoltaïques :

❖ Cellules à base de silicium cristallin :

Constituées de fines tranches de silicium monocristallin (un seul cristal), de silicium Polycristallin (bloc de cristaux) ou d'un ruban de Silicium. Leur fabrication requiert beaucoup

de matières premières et d'énergie. Elles continuent de dominer le marché en raison de leur statut commercial, de leur efficacité relativement élevée et de leur faible coût. Les cellules à base de silicium représentaient environ 94 % de la production mondiale de cellules photovoltaïques en 2016 et 93 % en 2015. Au cours de la dernière décennie, le rendement moyen des panneaux solaires composés de cellules à base de silicium cristallin a augmenté d'environ 12 % pour atteindre de 17 % à 20 %. En laboratoire, de tels panneaux peuvent atteindre jusqu'à 24,4 % d'efficacité.

❖ Cellules en couches minces :

Composées de fines couches d'un matériau photosensible déposées sur un support en verre, en acier inoxydable ou en plastique. Les principaux matériaux utilisés sont le silicium amorphe, le (CdTe), le diséléniure de cuivre et d'indium ou (CIGS). Leur fabrication requiert moins de matières premières et d'énergie. Les cellules faites de plusieurs couches minces, dites multi-jonctions, sont les plus efficaces. L'offre de cellules en couches minces a connu une importante consolidation au cours des dernières années, et elle semble vouloir augmenter. En effet, ces cellules présentent certains avantages dans des conditions d'exploitation particulières et elles sont de plus en plus concurrentielles. Le rendement des cellules multi-jonctions dépasse 40 %, mais leur coût de fabrication est encore trop élevé pour qu'elles soient fabriquées et offertes à grande échelle.

❖ Cellules organiques :

Constituées d'une fine couche d'un semi-conducteur organique sur un plastique fin qui ressemblent à une pellicule photographique flexible et légère. Il en existe actuellement trois types : celles à base de semi-conducteurs organiques cristallins, celles à base de semi-conducteurs organiques polymères et celles dites hybrides. Leur fabrication requiert un minimum de matières premières et d'énergie. Elles sont encore au stade de la recherche et du développement. On estimait en 2017 que leur rendement atteignait environ 12 %, cette figure I.13 représente les différentes technologies des cellules PV. [43]

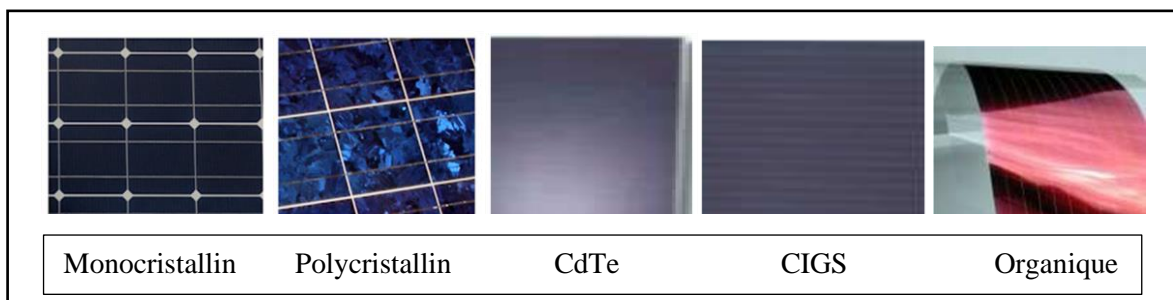


Figure I.13 : Technologie des cellules photovoltaïques. [44]

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :**+ Avantages :**

- Système fiable, ayant une longue durée de vie (environ 30 ans).
- Energie gratuite.
- Pas de pollution.
- Sa structure fixe, (Aucune pièce en mouvement).
- Son coup de maintenance bas.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité) : la nature modulaire des panneaux photovoltaïques permet le montage et l'adaptation aux différents besoins énergétiques. Le système peut varier en taille pour des applications allant de milliwatt à des centaines de Mégawatts.
 - L'installation ne produit aucun bruit.
 - Grand potentiel de sites d'implantation (bâtiments, stationnements pare-soleil, espaces ouverts, etc.). [45]

+ Inconvénients :

- Le coût élevé de l'installation : La fabrication de modules photovoltaïques est de haute technologie et nécessite des investissements coûteux.
 - Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque.
 - La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables (nuages).
 - Le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire pour une installation autonome.
 - Même si l'électricité produite par une installation photovoltaïque est sans pollution, la fabrication, l'installation et l'élimination des panneaux ont un impact sur l'environnement. [45]

I.4.3. Energie hydraulique :**A. Description :**

Le terme "hydraulique" désigne les centrales électriques qui utilisent le cours d'eau sur lequel elles sont installées pour produire de l'électricité continue. Ils sont utilisés pour répondre aux besoins électriques quotidiens des personnes. [46]

Plus la hauteur de la chute d'eau et la profondeur de la décharge sont grandes, plus la puissance électrique générée est grande.

En conséquence, chaque projet hydraulique est adapté aux caractéristiques spécifiques de l'emplacement afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles.[47]

La figure I.14 illustre la chaîne de conversion de l'énergie hydraulique.

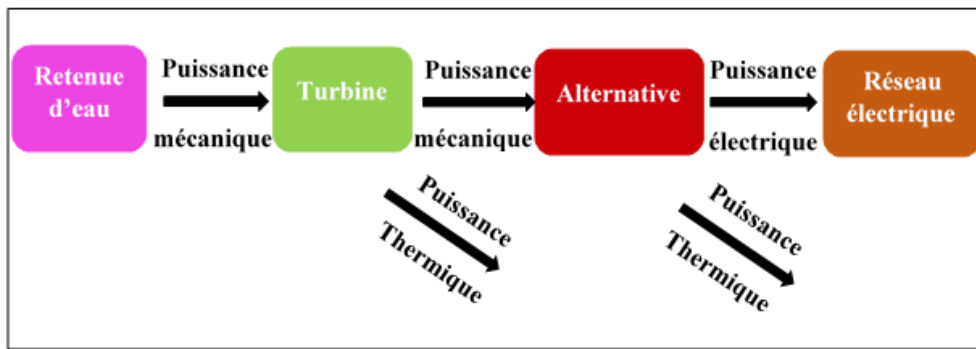


Figure I.14 : La chaîne de conversion de l'énergie hydraulique. [48]

B. Principe de fonctionnement :

L'énergie mécanique de l'eau est convertie en énergie électrique par une centrale hydraulique ou hydroélectrique : lorsque l'eau coule ou tombe d'une grande hauteur, elle propulse une machine rotative, la turbine, qui transfère l'énergie à un générateur capable de produire de l'électricité.

Il existe plusieurs types de centrales selon le lieu où elles sont implantées :

❖ Les centrales alimentées par une retenue d'eau :

Ils sont situés dans les montagnes. Un barrage a été construit pour bloquer l'écoulement de l'eau dans une vallée. Au lieu de s'évaporer normalement, l'eau est stockée dans un réservoir de rétention, comme montre dans la figure I.15.

Pour produire de l'électricité, elle est introduite dans un pipeline qui mène à une centrale électrique de niveau inférieur. [49]

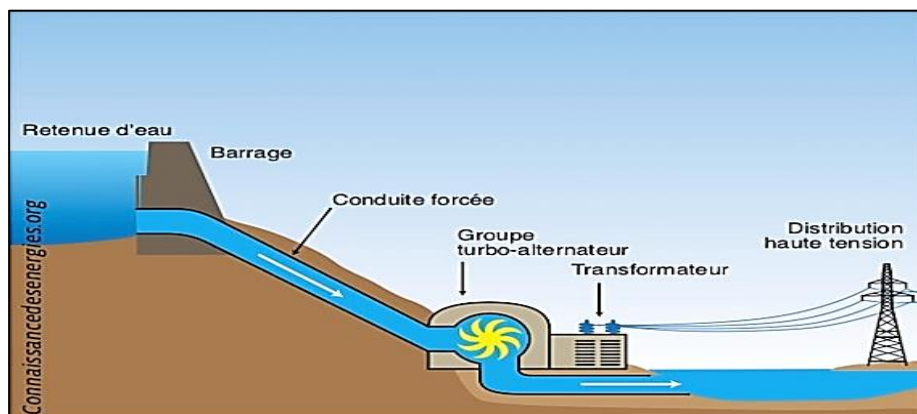


Figure I.15 : Centrales alimentées par une retenue d'eau. [50]

❖ Les centrales au fil de l'eau :

Ils utilisent le courant lorsqu'ils sont près d'une rivière ou d'un ruisseau. Eux aussi ont besoin d'un barrage, mais qui est beaucoup plus bas : nous parlons d'une centrale de basse chute. Ils sont incapables de stocker de l'énergie et de produire de l'électricité en continu, en fonction du déficit de débit d'eau. La figure I.16 représenté le fonctionnement d'une centrale au fil de l'eau.

En été, si l'approvisionnement en eau est faible, il n'y aura pas de production. Quand il pleut beaucoup en hiver, la productivité augmente. [49]

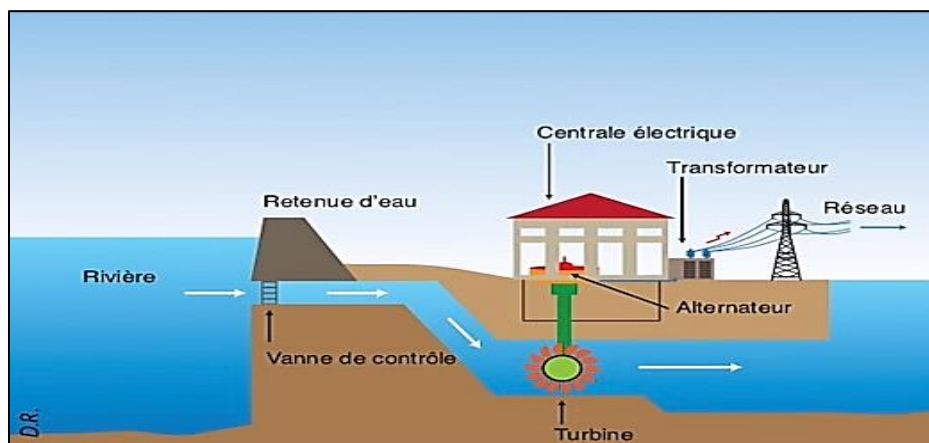


Figure I.16 : Centrales au fil de l'eau. [50]

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie hydraulique :

✚ Avantages :

- Energie renouvelable non intermittente : source de production électrique souple et stockable à grande échelle.
- C'est une énergie propre sans fumée et pollution ; n'émet pas de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité.
- La gestion des cours d'eau permet de contrôler les inondations :
- Installation qui dure longtemps.
- Apporte un revenu régulier à de petites communes. [49]

✚ Inconvénients :

- Impacts du barrage sur l'environnement et la biodiversité (faune et flore aquatique).
- Emissions de gaz à effet de serre lors de la construction du barrage.
- Impacts sur la société : expulsion de personnes habitant sur la zone.
- Les sédiments sont bloqués par les barrages et n'arrivent plus jusqu'aux côtes, qui s'érodent.

- Exigences géologiques et géographiques :
 - réservoir : zone large et dégagée
 - barrage : zone étroite
- Modification de l'aspect naturel du site. [49], [51]

I.4.4. Energie biomasse :

A. Description :

La biomasse est la fraction biodégradable des produits, des déchets et des résidus biologiques provenant de l'agriculture, de l'élevage, de la pêche et de l'aquaculture, ainsi que la partie biodégradable des déchets industriels et municipaux. La biomasse peut être utilisée principalement de deux manières :

- Lors de la fermentation des déchets, le gaz méthane peut être capté et utilisé comme source d'énergie,
- La biomasse elle-même peut être incinérée.

Dans tous les deux cas, l'énergie thermique peut être utilisée pour produire de l'électricité comme illustré dans la figure I.17. [52]

Elle rejette les gaz à effet de serre, mais ils sont absorbés naturellement par des arbres. Cependant, nous pourrions obtenir l'énergie la moins chère et surtout la plus locale du marché. [53]

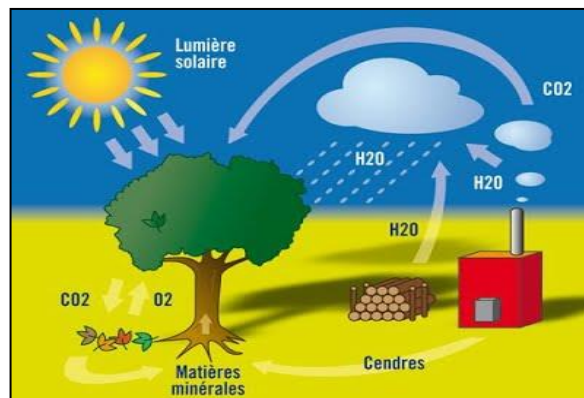


Figure I.17 : Cycle de conversion de l'énergie biomasse. [54]

B. Principe de fonctionnement :

Ce concept s'applique aux produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques ou agronomiques. On distingue deux types de biomasse :

❖ Biomasse sèche :

La source d'énergie la plus ancienne est le bois de chauffage. Les différents flux de déchets qui composent la biomasse sèche sont également appelés " bois énergie."

❖ Biomasse humide :

Agricole (fumiers, lisiers...), agro-alimentaire (déchets, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères...), et urbaines (déchets, boues d'épuration, fraction fermentescible des ordures ménagères...) et les déchets organiques constituent la "biomasse humide", qui peut être convertie en énergie ou en engrais/amendement. [55]

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie biomasse :**+ Avantages :**

- La biomasse participe au traitement et à la destruction des déchets organiques.
- A l'heure où le prix des carburants ne cesse d'augmenter, cette énergie serait une bonne alternative au pétrole.
- Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.
- La biomasse n'est pas inerte : après une période plus au moins longue, elle se dégrade et retourne à l'état gazeux.
- Les coûts d'investissement dans les forêts de biomasse sont relativement bas et stables ; l'exploitation est largement utilisée en raison de ressources de dispersion dans la région. [56], [57]

+ Inconvénients :

- Valorisation de déchets de bois industriels qui autrement seraient enfouis.
- Perte de biodiversité et appauvrissement des sols, si une quantité insuffisante de résidus de coupe sont laissés sur place.
- Emission de contaminants atmosphériques lors de la combustion et du transport de la biomasse (augmentation du transport routier pour les résidus de coupe).
- Impacts liés à l'entreposage de la biomasse : lixiviation de contaminants, nuisances visuelle et olfactive.
- Production de résidus ultimes (par exemple, cendres de bois) parfois difficiles à valoriser, en raison de la présence de métaux.
- C'est une source d'énergie faible dense. Pour chauffer pour un hiver il faudra une grande quantité de bois, ce qui nécessitera beaucoup de transport, de manipulation et un vaste espace de rangement. [58], [59]

I.4.5. Energie géothermique :

A. Description :

La géothermie est un nom d'origine grecque : “Gê” qui veut dire Terre et “Thermê” qui signifie chaleur. [60] C’est un mot qui désigne à la fois la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l’exploiter. Par extension, géothermie désigne l’énergie géothermique qui résulte de la conversion de l’énergie terrestre en chaleur. [61]

On distingue trois types de géothermie :

❖ **La géothermie à très basse température** : Son but est de capter la chaleur dans les cent premiers mètres de la surface sous terre.

On extrait de la chaleur du sol à températures inférieure à 30°C au moyen d’un liquide caloporteur qui est pompé puis passé à travers une pompe à chaleur qui agit un peu comme un réfrigérateur à l’envers en ce sens qu’elle extrait la chaleur du liquide caloporteur et la rehausse puis retourne le liquide refroidi dans le circuit sous la terre pour qu’il s’y réchauffe à nouveau et puis pomper.

Cette technique est adaptée pour le secteur résidentiel.

❖ **La géothermie à basse température** : Fonctionne selon le même principe que la précédente. Elle capte son énergie de chaleur au moyen de puits creusés à des profondeurs allant de 120 à 2000 mètres.

La température du liquide caloporteur peut y atteindre 30 à 100°C et celui-ci sera pompé, puis circulé dans un échangeur de chaleur pour être ensuite retourné dans le circuit en boucle.

Cette technologie permet le chauffage de grands bâtiments à vocation industrielle ou commerciale.

❖ **La géothermie profonde à haute température** : Cette dernière technique consiste à produire de l’électricité en utilisant l’énergie thermique stockée sous terre, en particulier dans les régions volcaniques telles que l’île de Man.

Dans les applications de construction, une pompe à chaleur géothermique se compose de trois composants essentiels : un échangeur de chaleur souterrain qui sert de source de chaleur ou de dissipateur de chaleur, une thermopompe et un cylindre de distribution.

Le concept est d'utiliser l'énergie libre qui est disponible presque tout le temps sous la surface.

Selon la configuration de la boucle souterraine, on distingue des systèmes à boucle ouverte et des systèmes à boucle fermée. Et selon la disposition de la boucle souterraine, on a des boucles verticales et des boucles horizontales. [62] La figure I.18 montre les différents types d'énergie géothermique.

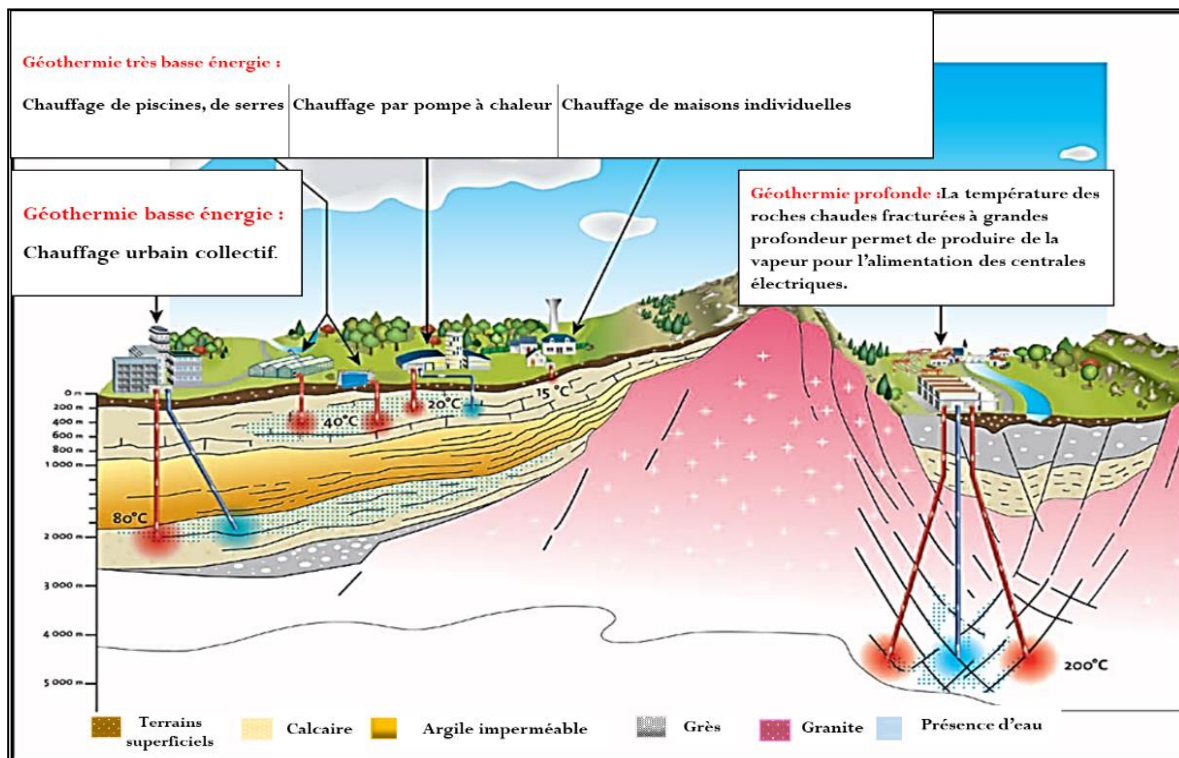


Figure I.18 : Types de l'énergie géothermique. [63]

B. Principe de fonctionnement :

Pour capter l'énergie géothermique, un fluide circule profondément sous l'intérieur de la terre. Ce fluide peut provenir d'une nappe d'eau chauffée naturellement ou d'eau injectée sous pression pour fracturer une roche chaude et imperméable. Ce principe est présenté sur la figure I.19.

Dans les deux cas, le fluide se réchauffe et reconstitue son apport calorifique (énergie thermique). Ces calories sont utilisées directement ou partiellement converties en électricité.

[61]

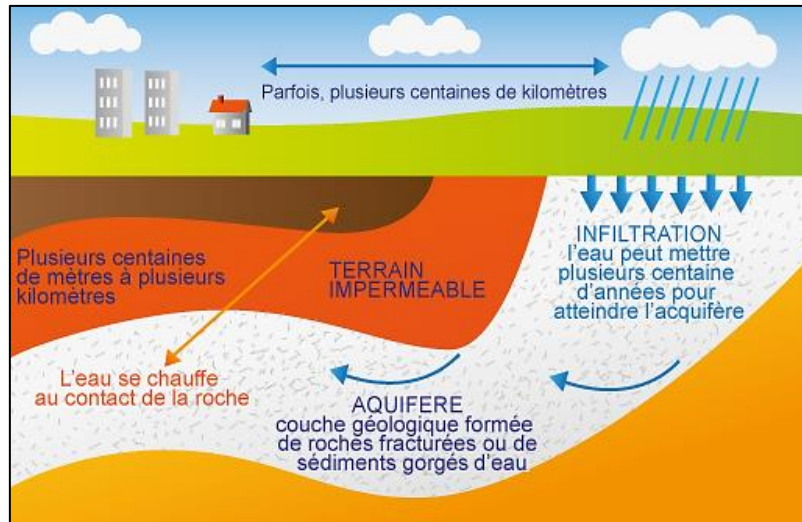


Figure I.19 : Principe de fonctionnement de l'énergie géothermique. [64]

C. Les avantages et les inconvénients de l'énergie géothermique :

+ Avantages :

- La géothermie de profondeur ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).
- C'est une source d'énergie quasi-continue.
- Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années (30 à 80 ans en moyenne).

+ Inconvénients :

- Les sites de forages sont limités en fonction du type de roche (roche chaude facile à percer).
- Risque de rejets gazeux nocifs ou toxiques.
- Risque de réchauffement du site de forage.
- Certaines pratiques de forages augmentent les risques sismiques.
- Certaines technologies utilisent des produits chimiques à fort impact environnemental.

[51]

I.5. Evolution des énergies renouvelables dans le monde : IRENA (International Renewable Energy Agency) :

Le 5 avril 2021 et à Abu Dhabi, United Arab Emirates : en 2020, les nouvelles capacités en énergies renouvelables ont dépassé les estimations et battu tous les records, malgré le ralentissement économique provoqué par la pandémie de COVID-19. voir la figure I.20.

Selon les données publiées aujourd'hui par l'Agence Internationale des Énergies Renouvelables (**IRENA**), plus de 260 gigawatts (**GW**) de capacité d'énergie renouvelable ont été installés l'année précédente, ce qui représente une augmentation de 50% par rapport au chiffre de l'année précédente. La baisse de la capacité nette de production d'électricité à partir de combustibles fossiles en Europe, en Amérique du Nord et, pour la première fois, en Eurasie (Arménie, Azerbaïdjan, Géorgie, Fédération de Russie et Turquie) explique en partie la croissance relative des sources d'énergie renouvelables.

Au total, 60 **GW** de nouvelle capacité basée sur les combustibles fossiles devraient être installée en 2020, contre 64 **GW** l'année précédente, ce qui indique que la tendance à l'expansion des combustibles fossiles se poursuit.

L'augmentation de la capacité installée (de 10,3%) surpasse les estimations à long terme, qui prévoient une croissance plus progressive d'une année à l'autre. À la fin de 2020, la capacité mondiale de production d'énergie renouvelable était passée à 2 799 **GW**, l'hydroélectricité continuant à être en tête (1 211 **GW**), malgré le rattrapage rapide du solaire et de l'éolien.

Les nouvelles installations solaires (127 **GW**) et éoliennes (111 **GW**) sont les deux sources variables d'énergie renouvelable qui ont dominé l'expansion de la capacité en 2020.

[65]

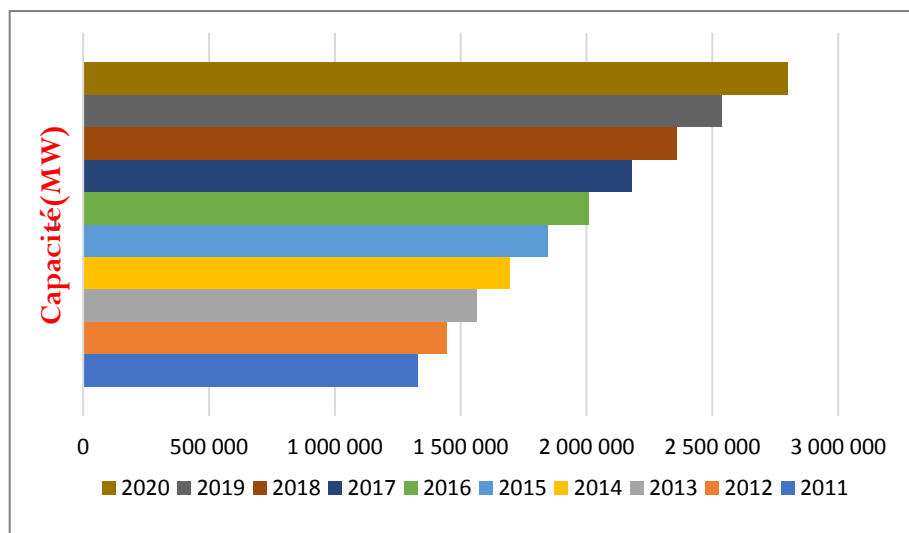


Figure I.20 : Evolution de la capacité des énergies renouvelables dans le monde (MW). [65]

La Chine et les États-Unis d'Amérique ont connu la croissance la plus rapide du marché, qui devrait se poursuivre jusqu'en 2020. La Chine, qui dispose déjà du plus grand marché mondial des énergies renouvelables, a reçu 136 **GW** de capacité supplémentaire l'année dernière, principalement sous forme d'énergie éolienne (72 **GW**) et solaire (49 **GW**).

Les États-Unis d'Amérique se sont dotés quant à eux de 29 **GW** de capacité énergétique de sources renouvelables l'an dernier, soit une augmentation 80% plus rapide qu'en 2019, et répartie entre le solaire (15 **GW**) et l'éolien (env. 14 **GW**). L'Afrique a poursuivi son développement régulier : une nouvelle capacité de 2,6 **GW** a été ajoutée au continent en 2019, soit un peu plus qu'en 2018.

L'Océanie est restée la région à la croissance la plus rapide (+ 18,4%), bien qu'elle ne représente qu'une petite fraction de la capacité mondiale et que presque toute cette expansion ait eu l'Australie pour théâtre. [65]

Les capacités électriques renouvelables présentées dans la figure I.21 représentent la capacité maximale (**MW**) nette (par continent) de génération des centrales électriques et autres installations utilisant des sources d'énergie renouvelables pour produire de l'électricité du 2011 jusqu'à 2020.

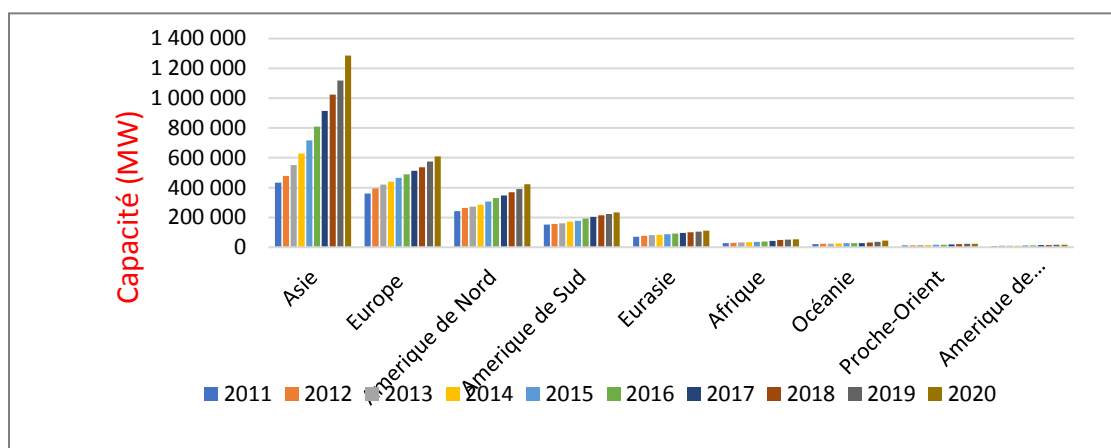


Figure I.21 : Evolution de la capacité des énergies renouvelables par continent (MW) (2011-2020). [65]

✓ Points forts par technologie : (2020)

❖ Hydroélectricité :

La croissance de l'hydroélectricité devrait reprendre en 2020, de nombreux grands projets devant débiter en 2019 étant terminés cette année. La Chine dispose désormais d'une capacité supplémentaire de 12 **GW**, tandis que la Turquie dispose d'une capacité supplémentaire de 2,5 **GW**.

❖ Énergie éolienne :

L'expansion de l'énergie éolienne a presque doublé en 2020 par rapport à 2019 (111 **GW** contre 58). La Chine dispose 72 **GW** de nouvelles capacités, tandis que les États-Unis

d'Amérique en ont 14. Dix autres pays ont augmenté leur capacité de production d'énergie de source éolienne de plus de 1 **GW** en 2020. L'éolien offshore s'est développé pour atteindre environ 5 % de la capacité éolienne totale en 2020.

❖ Énergie solaire :

La capacité solaire globale a maintenant atteint presque le même niveau que la capacité éolienne, en grande partie grâce à l'expansion que l'Asie a connue en 2020. (78 **GW**).

En Chine (49 **GW**) et au Vietnam, la capacité installée a considérablement augmenté (11 **GW**). Le gouvernement japonais a reçu 5 **GW** supplémentaires.

L'Inde et la République de Corée disposent désormais d'une capacité d'énergie solaire supplémentaire de plus de 4 **GW**. Les États-Unis d'Amérique ont reçu 15 **GW** supplémentaires.

❖ Bioénergie :

Le rythme d'augmentation de la capacité a ralenti de moitié d'ici 2020. (2,5 **GW** contre 6,4 **GW** pour 2019). La capacité de production de bioénergie de la Chine a augmenté de plus de 2 **GW**. L'Europe est la seule autre région à avoir connu une croissance significative en 2020, avec une capacité de production de bioénergie en augmentation de 1,2 **GW**, un chiffre proche de celui de 2019.

❖ Énergie géothermique :

En 2020, il y a eu très peu de nouveaux ajouts de capacité. La Turquie a reçu une capacité supplémentaire de 99 mégawatts, et de petites extensions ont eu lieu aux États-Unis, en Italie et en Nouvelle-Zélande. Électricité hors réseau : la capacité hors réseau a augmenté de 365 **MW** en 2020 (+ 2 %) pour atteindre 10,6 **GW**. L'énergie solaire a augmenté de 250 **MW** à 4,3 **GW**, tandis que l'hydroélectricité est restée pratiquement la même à environ 1,8 **GW**. [65] La figure I.22 est précise les points forts par technologie (2020).

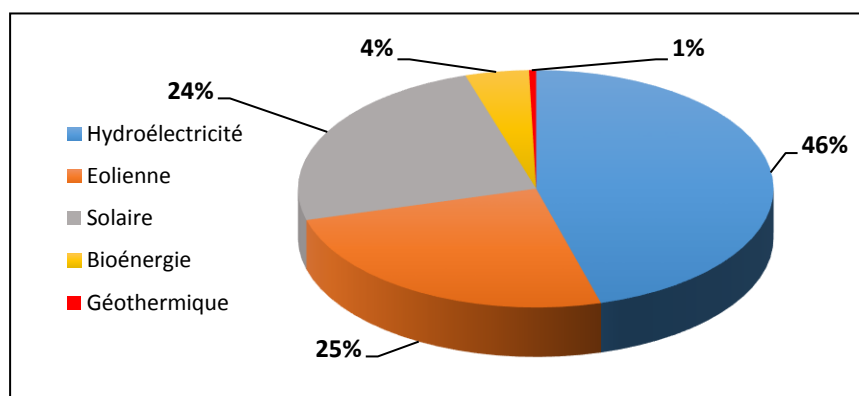


Figure I.22 : Points forts par technologie (2020). [65]

Les statistiques annuelles sur les capacités d'énergie renouvelable publiées par l'IRENA en 2021 montrent que, pour la deuxième année consécutive, ces capacités ont considérablement augmenté par rapport au nombre global de nouvelles capacités de production d'énergie installées.

Plus de 80% de toutes les nouvelles capacités d'électricité mises en place l'an dernier exploitent des sources d'énergie renouvelables. Le solaire et l'éolien comptent pour 91 % de ces nouvelles capacités. [65]

I.6. Les énergies renouvelables en Algérie :

I.6.1. Statistiques de la capacité des énergies renouvelable en Algérie :

L'Algérie, comme tous les autres pays, a tracé sa feuille de route pour l'utilisation et la promotion des sources d'énergie renouvelables. Motivé par son engagement envers la communauté internationale dans la lutte contre le changement climatique et sa propriété de l'un des plus grands panneaux solaires du monde. [66]

Nous allons d'abord donner un aperçu de la situation des énergies renouvelables en Algérie, d'après les statistiques d'IRENA.

La figure I.23 et la figure I.24 représentent respectivement le développement des énergies renouvelables et la capacité des énergies renouvelables hors réseaux en Algérie (2011 - 2020).

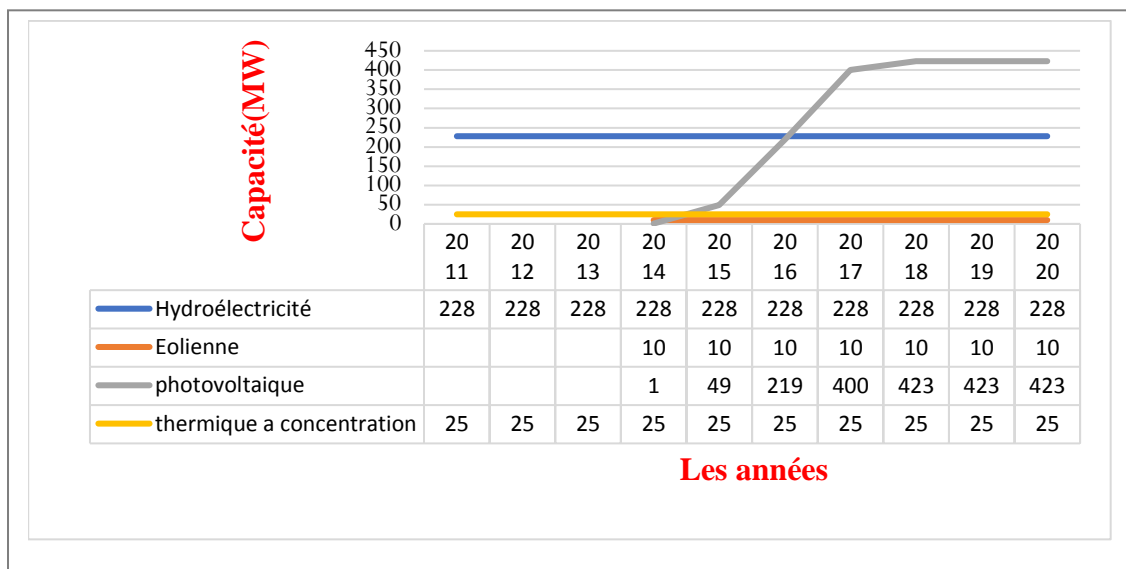


Figure I.23 : Développement des énergies renouvelables en Algérie (2011 - 2020). [65]

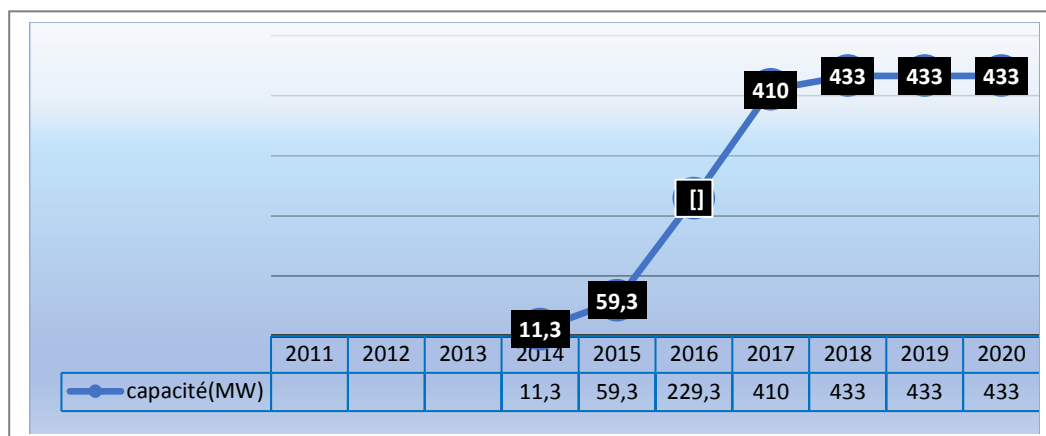


Figure I.24 : Capacité des énergies renouvelables hors réseaux en Algérie (2011 - 2020). [65]

I.6.2. Analyse de la situation énergétique en Algérie (2020) :

La réédition en 2015 de la première édition du **PNEREE** publiée en 2011, a été principalement motivée par des changements importants dans le monde en termes d'investissement et de coûts de production d'électricité basés sur les ressources renouvelables.

En effet, il est à rappeler que c'est le (**CSP**) qui a été initialement adopté pour générer 7200 MW d'électricité solaire, soit plus de 2.5 fois la part du solaire photovoltaïque (2800 MW) voir le tableau I.1. Or, si en 2011 les coûts de production d'électricité à base de ces deux technologies étaient sensiblement les mêmes (0.35 dollars/KWh), ceux relatifs au solaire photovoltaïque ont par la suite fortement chuté jusqu'à moins de 0.15 dollars/KWh en 2015, alors que ceux du **CSP** n'ont que peu évolués et sont restés bien au-dessus de 0.25 dollars/KWh.

Tableau I.1 : Part de chacune des ressources renouvelables primaires retenues. [66]

Solaire thermique à concentration (CSP)	Solaire PV	Éolien	Total
7200 MW	2800 MW	2000 MW	12000 MW

C'est ce constat qui a été à la base d'une révision en profondeur de la première version du programme malgré son lancement relativement récent. Ainsi, la part du **CSP** a été revue à la baisse (2000 MW au lieu de 7200 MW) tout en reportant son développement effectif au-delà de 2021, alors que celle du solaire photovoltaïque a été multipliée par 5 environ (13575 MW au lieu de 2800 MW), soit 62 % de l'ensemble des 22000 MW prévus à l'horizon 2030. Mieux encore, plus de 4500 MW dont les 2/3 de solaire photovoltaïque, sont programmés pour être réalisés avant 2020 selon le planning porté dans le tableau I.2.

Tableau I.2 : Plan d'exécution du PNEREE révisé en 2015 (en MW). [66]

	1 ^{ère} Phase 2015-2020	2 ^{ème} Phase 2021-2030	Total
Photovoltaïque	3 000	10 575	13 575
Eolien	1 010	4 000	5 010
CSP	-	2 000	2 000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1 000
Géothermie	05	10	15
Total	4 525	17 475	22 000

Cependant et avec le recul, on observe qu'à ce jour (2020), au même titre que la première version du programme, le planning tracé n'a été ni suivi ni même vu un début d'application quelconque. En effet, la seule activité visible sur le terrain dans le domaine des énergies renouvelables dans le pays depuis 2015, a essentiellement été dominée par la réception (étalée jusqu'en 2017). Des centrales solaires photovoltaïques totalisant 343 MW du programme lancé en 2014 par SKTM (Sharikat Kahrab wa Takat Moutadjadida) à côté de cela, SONATRACH, a mis en service en 2018 une première centrale solaire photovoltaïque de 10 MW_c à Bir Rebaa Nord, wilaya de Ouargla et ce dans le cadre de sa stratégie qui vise à déployer une capacité totale de 2300 MW en énergie solaire à l'horizon 2030. [66]

I.6.3. Energie solaire en Algérie :

I.6.3.1. Energie solaire thermique :

L'Algérie entend maximiser son potentiel solaire, qui est l'un des plus importants au monde, en lançant de grands projets solaires thermiques. Au cours des années 2011-2013, deux projets pilotes de centrales thermiques concentrées d'une capacité totale d'environ 150 MW chacune ont été lancés. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de Hassi R'mel, d'une capacité de 150 MW et de 25 MW d'énergie solaire. Au cours de la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques d'une capacité combinée d'environ 1200 MW devraient être mises en service.

Le programme phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 mégawatts par an jusqu'en 2023, puis de 600 mégawatts par an jusqu'en 2030. [67]

I.6.3.2. Energie solaire photovoltaïque :

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'avancement rapide du développement de l'énergie solaire. D'ici 2020, le gouvernement prévoit de lancer plusieurs projets d'énergie solaire photovoltaïque d'une capacité totale d'environ 800 mégawatts. D'autres projets d'une capacité de 200 MW par an devraient être achevés entre 2021 et 2030. [67]

Les centrales Photovoltaïques et solaires thermiques qui sont mise en service sont classées dans le tableau I.3.

Tableau I.3 : Les centrales Photovoltaïques et solaires thermiques mise en service.
[66], [5]

Projet	Capacité installée	Région	Année de mise en service	Maitre d'ouvrage
Centrale solaire composé de 109 systèmes PV	0.453MW _c	Wilayas du Sud : d'Adrar, Tindouf, Tamanrasset, Illizi	1998	SONELGAZ
Centrale solaire PV	0.5 MW _c	Sud : M'sila, El- ooud, Tamanrasset, Illizi, Ghardaïa	2006- 2010	SONELGAZ
Centrale hybride solaire-gaz (CSP)	120 MW _c cycle combiné, 30 MW solaire thermique	Hassi Rmel (Laghouat)	Juillet 2011	ABENER/ NEAL/ COFIDES/SON ATRA-CH
Centrale PV pilote	1,1MW _c	Ghardaïa (Oued N'chou)	Juin 2014	SONELGAZ
Centrales PV	343 MW _c	Hauts plateaux et grand sud	2015- 2018	SONELGAZ
Centrale solaire PV	10 MW _c	(bir rebaa nord ou brn) près de ouargla	2018	SONATRACH

I.6.4. Energie éolienne en Algérie :

A ce jour, une première et unique ferme éolienne d’une puissance de 10 MW a été installée et mise en service en juin 2014 dans la région de Kaberten dans la wilaya d’Adrar. Entre 2014 et 2015. [68], [69]

I.6.5. Potentiel des énergies renouvelables en Algérie :

I.6.5.1. Potentiel de l’énergie solaire :

En raison de sa situation géographique, l’Algérie est classée comme étant l’un des pays les mieux dotés en ressources solaires au monde et au bassin méditerranéen ; soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, et 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. [70]

La figure I.25 est montrée la répartition de l’énergie solaire en Algérie.

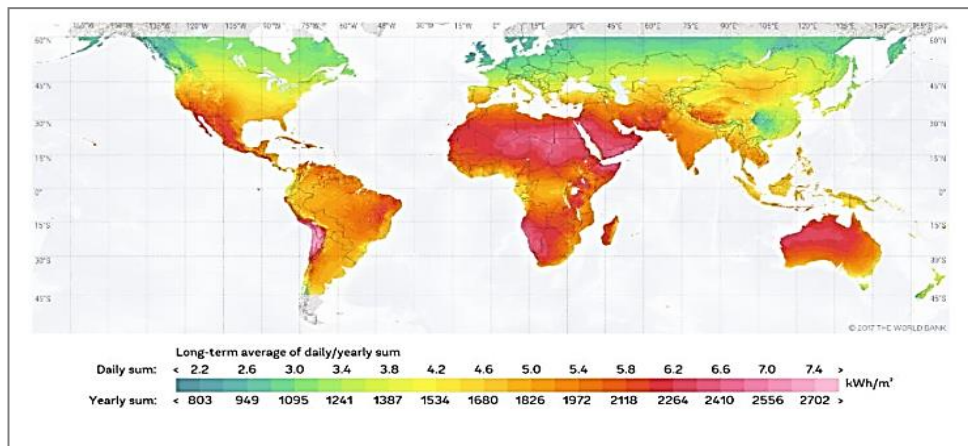


Figure I.25 : Potentiel de l’énergie solaire en Algérie. [71]

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards GW/h par an avec une durée d’insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépassant les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et au Sahara selon le tableau I.4.

Tableau I.4 : Potentiel de l’énergie solaire en Algérie par région. [72]

Régions	Région Côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m²/an)	1700	1900	2650

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 **KWh** sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700kWh/m²/an au nord et 2263 KWh/m²/an au sud du pays (ministère de l'énergie, 2018). [70]

La figure I.26 illustre l'irradiation solaire globale reçue sur plan incliné.

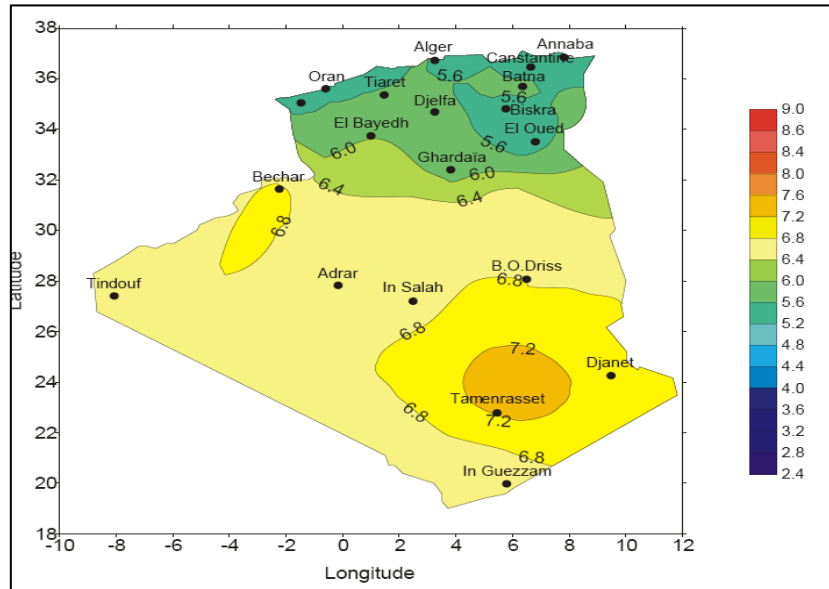


Figure I.26 : Irradiation solaire globale reçue sur plan incliné à la latitude du lieu moyenne annuelle. [73]

Et le potentiel solaire à concentration est illustré dans la figure I.27.

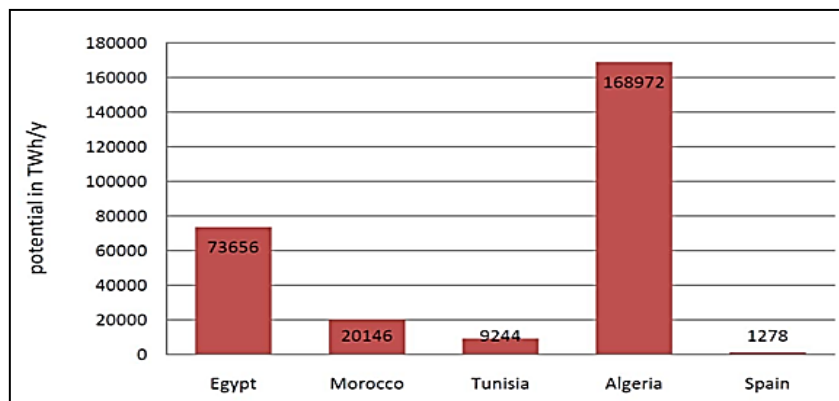


Figure I.27 : Potentiel solaire à concentration. [74]

I.6.5.2. Potentiel de l'énergie éolienne :

La ressource éolienne en Algérie varie considérablement d'un endroit à l'autre. Cela est principalement dû à la topographie et au climat diversifié. En effet, notre grand pays est divisé en deux zones géographiquement distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 **Km** et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'atlas

tellien et l’atlas saharien. Des plaines et des hauts plateaux au climat continental s’intercalent entre elles. Le sud, quant à lui, se caractérise par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement dans le sud- est, avec des vitesses supérieures à 6 m/s dans la région de Tamanrasset. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée, comme représente dans la figure I.28. [73]

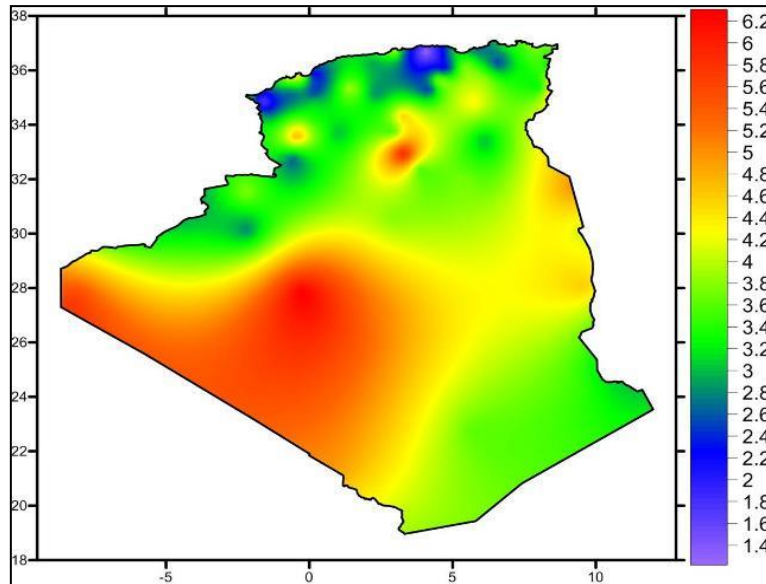


Figure I.28 : Potentiel de l’énergie éolienne. [73]

I.6.5.3. Potentiel de l’énergie géothermique :

Le potentiel de l’énergie géothermique en Algérie situé principalement au Nord comme montre la figure I.29, Il en ressort cependant, que les régions du Nord - Est et du Nord - Ouest présentent un plus grand intérêt vues les conditions géologiques et le nombre de manifestations thermales. [75]

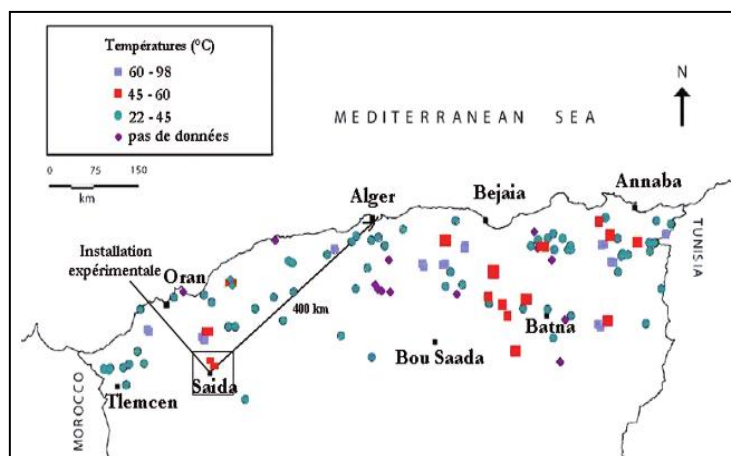


Figure I.29 : Potentiel géothermique en Algérie. [76]

Trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence : au nord-est, plus particulièrement dans les régions constantinoises, au nord-ouest (les régions de l'Oranie), en plus des nombreuses sources thermales dans le sud algérien et plus exactement dans le sud-ouest. Dans ces régions, la valeur du gradient géothermique peut aller jusqu'à $7\text{ }^{\circ}\text{C} / 100\text{ m}$ [73]. La figure I.30 explique ce fort gradient.

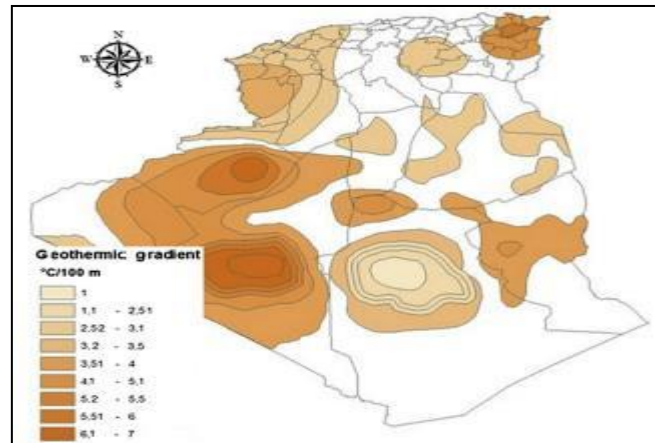


Figure I.30 : Gradient géothermique. [73]

I.6.5.4. Potentiel de l'énergie la biomasse :

La biomasse offre de grandes promesses avec 3,7 millions de **TEP** provenant des forêts et 1,33 million de **TEP** par an provenant des déchets agricoles et urbains (365 kg/an par algériens en tant que déchets urbains) ; Cependant, ces potentiels ne sont pas encore améliorés et consommés. [67]

I.6.5.5. Potentiel hydraulique :

Les quantités mondiales tombant sur le sol algérien sont importantes, estimées à 65 milliards de m^3 , mais elles profitent peu au pays : moins de jours de précipitations, concentration sur des lieux limités, forte évaporation et évacuation rapide vers la mer.

Les ressources de surface diminuent du nord au sud, selon math. Actuellement, les ressources utiles et renouvelables sont estimées à environ 25 milliards de m^3 , les ressources de surface représentant environ les deux tiers du total. Au total, 103 sites de barrages ont été examinés. Plus de 50 barrages sont maintenant opérationnels. [5]

I.6.6. Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie :**I.6.6.1. Développement des énergies renouvelables en Algérie :**

A travers le lancement d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (**ER**) et de l'efficacité énergétique, l'Algérie a développé une dynamique d'énergie verte basée sur une stratégie centrée sur la valorisation des ressources inépuisables et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer le pays à l'avenir. Ainsi, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Près de quatre années après le lancement du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, adopté en février 2011 par le gouvernement, il est apparu dans sa phase expérimentale et de veille technologique, des éléments nouveaux et pertinents sur la scène énergétique, aussi bien nationale qu'internationale, nécessitant la révision du programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Parmi ces éléments, il convient de citer :

- Une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables à travers les études engagées, lors de cette première phase, notamment les potentiels solaire et éolien ;
- La baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer (maturité technologique, coûts compétitifs ...) ;
- Les coûts de la filière **CSP** qui restent élevés associés à une technologie non encore mature notamment en termes de stockage avec une croissance très lente du développement de son marché.

En conséquence, le programme d'énergie renouvelable actualisé prévoit l'installation d'une source d'énergie renouvelable de l'ordre de 22 000 mégawatts (**MW**) pour le marché national d'ici 2030, l'option de l'exportation restant un objectif stratégique si les conditions du marché le permettent.

A la faveur de ce nouveau programme, les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie.

Ainsi d'ici 2030, 37 % de la capacité installée et 27 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale, seront d'origine renouvelable.

L'intégration du renouvelable dans le mix énergétique constitue un enjeu majeur en vue de préserver les ressources fossiles, de diversifier les filières de production de l'électricité et de contribuer au développement durable. [12]

I.6.6.2. Programme de développement des énergies renouvelables en Algérie :

Cette initiative se concentre sur le développement à grande échelle des énergies photovoltaïques et renouvelables. L'introduction de (CSP), ainsi que les secteurs de la biomasse, des énergies renouvelables et de l'énergie géothermique, interviendront progressivement.

La capacité et les types d'énergie renouvelable à installer seront déterminés par les caractéristiques uniques de chaque région :

- **Région saharienne**, pour l'hybridation des centrales diesel existantes et l'alimentation des zones reculées, compte tenu du potentiel solaire et éolien important de la région.

- **La région des hauts plateaux**, avec son potentiel de solitude et d'exposition au vent, ainsi que la disponibilité des terres.

- **Région littorale**, basée sur la disponibilité des terrains d'assises et l'utilisation de tous les espaces à potentiel d'énergie renouvelable.

I.6.6.3. Développement de l'efficacité énergétique en Algérie :

L'efficacité énergétique devrait occuper une place centrale dans le contexte énergétique national, qui se caractérise par une croissance rapide de la consommation, en particulier dans le secteur domestique avec la construction de nouveaux logements, la construction d'infrastructures de services publics et la restructuration industrielle.

L'efficacité énergétique, liée au développement des énergies renouvelables, permet de réduire les investissements nécessaires pour répondre aux besoins énergétiques, grâce à une gestion attentive de la consommation et de la croissance de la demande.

L'Algérie aspire à atteindre des objectifs ambitieux dans ce domaine à travers sa politique d'efficacité énergétique, afin de réduire la consommation d'énergie, de protéger l'environnement et de préserver cette richesse pour les générations futures dans un modèle de développement durable.

Cette politique a été adoptée par la mise en œuvre d'un ambitieux programme d'efficacité énergétique dont la portée englobait tous les secteurs d'activité, y compris la construction, l'industrie et les transports. [12]

I.6.6.4. Programme de l'efficacité énergétique en Algérie :

L'objectif du programme d'efficacité énergétique est de réduire progressivement la consommation.

Sa mise en œuvre se traduirait par des économies d'énergie cumulées de près de 90 millions de **TEP**, dont 60 millions de **TEP** pour la période 2015-2030 et 30 millions de **TEP** pour la période postérieure à 2030, ce qui correspond au cycle de vie des équipements utilisés et des bâtiments achevés. [12]

En conséquence, d'ici 2030, il devrait être possible de réduire la consommation d'énergie d'environ 10%. La figure I.31 suivante explique le programme de l'efficacité énergétique en Algérie. [12]



Figure I.31 : Programme de l'efficacité énergétique. [77]

Le programme de l'efficacité énergétique et des économies d'énergie consiste, principalement, en la réalisation des actions suivantes :

❖ **L'amélioration de l'isolation thermique des bâtiments ;**

Le volet bâtiment du programme consiste en l'introduction et la diffusion des pratiques et des technologies innovantes autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Pour ces dernières, des mesures adéquates sont prévues au niveau de la phase de leur conception architecturale. L'objectif de ce programme à l'horizon 2030 est d'atteindre un gain cumulé d'énergie évalué à plus de 7 **MTEP**. [12]

❖ **Développement du chauffe-eau solaire :**

Pour l'usage (individuel et collectif) de l'eau chaude, la priorité accordée par les pouvoirs publics, via ce programme, est la substitution du chauffage à gaz par le chauffage solaire. À ce titre, en plus de la promotion de la climatisation solaire, des efforts considérables seront fournis, en vue de favoriser la pénétration massive des chauffe-eau solaires avec une attention particulière pour leur fabrication locale.

À l'horizon 2030, l'objectif étant la réalisation d'une économie d'énergie évaluée à plus de 2 **MTEP**. [12]

❖ **Généralisation de l'utilisation des lampes à basse consommation d'énergie :**

L'objectif, à terme, des actions prévues dans le cadre de ce volet est la substitution de la totalité des lampes à incandescence par des lampes énergétiquement performantes. Pour ce faire, il est prévu, dans une première étape, l'arrêt de l'utilisation des lampes à incandescence. Les gains, à l'horizon 2030 sont estimés à près de 20 **MTEP**. La production locale des lampes à basse consommation sera encouragée. [12]

❖ **Introduction de la performance énergétique dans l'éclairage public :**

Le programme de l'efficacité énergétique dédié aux collectivités locales consiste à substituer la totalité des lampes à mercure (énergivores et nocives) par des lampes plus efficaces (sodium haute pression). Ce qui permettra d'atteindre une économie d'énergie de près d'un (01) million de **TEP**, à l'horizon 2030 et d'alléger la facture énergétique des collectivités. [12]

❖ **Promotion de l'efficacité énergétique dans le secteur industriel :**

Le programme vise à amener les industriels à plus de sobriété et de pondération dans leur consommation énergétique. En effet, l'industrie représente un enjeu pour l'efficacité énergétique du fait que sa consommation est appelée à croître à la faveur de la relance de ce secteur. À ce titre, l'objectif attendu en matière d'économie d'énergie est évalué à plus de 30 **MTEP** ; pour plus d'efficacité énergétique, il est prévu : la généralisation des audits énergétiques et du contrôle des procédés industriels qui permettront d'identifier les gisements d'économie d'énergie substantiels et de préconiser des plans d'actions correctifs ; l'encouragement des opérations de réduction de la surconsommation des procédés industriels, à travers un soutien de l'état au financement de ces opérations. [12]

❖ **Promotion du GPL/C (Gaz de pétrole liquéfié carburant.) et du GN/C (Gaz naturel carburant) :**

L'objectif de l'initiative est de promouvoir les carburants les plus largement disponibles et les moins polluants, tels que le **GPL/C** et le **GN/C**, et d'améliorer la structure de la chaîne d'approvisionnement en carburant et d'aider à atténuer les effets négatifs des carburants traditionnels sur la santé humaine et l'environnement.

Ce programme envisage, à long terme, l'utilisation généralisée de carburants de remplacement dans les transports individuels et collectifs, en particulier en milieu urbain. [12]

❖ Introduction des principales techniques de climatisation solaire :

L'utilisation de l'énergie solaire pour la climatisation est une application qui devrait être encouragée, en particulier dans le sud du pays, car la majorité du temps, les besoins en froid coïncident avec la disponibilité du rayonnement solaire (fonctionnement au fil du soleil).

De plus, pendant la saison froide, le champ de capteurs solaires peut être utilisé pour fournir de l'eau chaude pour l'assainissement et pour chauffer le bâtiment. En conséquence, le retour sur investissement global du projet est assez intéressant.

Des études seront menées pour adapter et améliorer les techniques de rafraîchissement solaire, permettant de maintenir le meilleur système en milieu algérien. Deux projets pilotes de climatisation par absorption et adsorption se concentreront sur la climatisation solaire des bâtiments dans le sud du pays. [4]

I.6.7. Développement des capacités industrielles en Algérie :

L'Algérie entend renforcer son tissu industriel afin d'être à la pointe des mutations positives, tant sur les plans industriel et technique qu'en matière d'ingénierie et de recherche, afin de soutenir et de réussir son programme d'énergies renouvelables et d'efficacité énergétique.

L'Algérie est également déterminée à investir dans tous les segments créateurs de valeurs et à les développer localement. [12]

I.6.7.1. Solaire photovoltaïque :

L'objectif pour le photovoltaïque est de construire des unités industrielles, en particulier des usines de fabrication de modules photovoltaïques, afin de répondre aux exigences d'un programme de 13500 MW d'ici 2030.

Des actions pour renforcer l'activité d'ingénierie et soutenir le développement de l'industrie photovoltaïque à travers la formation d'un partenariat qui rassemble de nombreux acteurs et un appel à centres de recherche.

L'objectif pour la période 2015-2020 est d'augmenter le taux d'intégration des capacités algériennes, notamment par le développement conjoint d'usines de fabrication de modules photovoltaïques. [12]

En outre, il est prévu qu'un réseau national de sous-traitance soit établi pour la fabrication d'onduleurs, de batteries, de transformateurs, de câbles et d'autres équipements utilisés dans la construction d'une centrale photovoltaïque.

L'Algérie devrait disposer, également, sur la même période, de capacités de conception, de procurément et de réalisation par le biais d'entreprises algériennes.

Il est, également, prévu la réalisation, d'un centre d'homologation des équipements, notamment ceux destinés aux installations **ER** et les électroménagers.

Cette période serait marquée par le développement d'un réseau de sous-traitance nationale pour la fabrication des équipements nécessaires à la réalisation de ce programme. Elle devrait, également, être marquée par la maîtrise totale des activités d'engineering, de procurément et de construction des centrales et des unités de dessalement des eaux saumâtres.

Si les conditions sont réunies, il est prévu au courant de cette même période d'exporter non seulement l'électricité produite à partir des renouvelables mais aussi le savoir-faire et les équipements entrant dans la production d'électricité à partir des énergies renouvelables. [12]

I.6.7.2. Solaire thermique :

Sur la période 2015 – 2020, il est prévu la poursuite des études pour la fabrication locale des équipements de la filière solaire thermique.

Sur la période 2021 - 2030, il est prévu de promouvoir le partenariat pour la mise en œuvre de projets majeurs qui seront menés en parallèle avec des actions de renforcement des capacités d'engineering, de conception, de procurément et de réalisation pour la fabrication d'équipements intervenant dans une centrale **CSP** par des moyens propres. [12]

I.6.7.3. Eolien :

Il est prévu de poursuivre les efforts pour la mise en place, en partenariat, d'une industrie éolienne. Il est prévu aussi la conception, le procurément et la réalisation d'éoliennes par des moyens propres ainsi que la maîtrise des activités d'engineering, de procurément et de construction de fermes éoliennes. [12]

I.6.7.4. Isolation thermique :

L'objectif de ce programme est d'introduire les caractéristiques d'efficacité énergétique dans les constructions neuves et existantes. Ceci en développant les filières industrielles de fabrication des isolants thermiques de l'enveloppe (murs et toitures) et le double vitrage, en utilisant les matériaux locaux (laine de roche, laine de verre...). [78]

I.6.7.5. Eclairage performant :

Il est préconisé pour la réalisation des objectifs assignés au programme de maîtrise de l'énergie la substitution des lampes classiques (incandescence et à mercure) par des lampes

performantes (lampes basse consommation, LED, et lampes à sodium), avec l'objectif de développement de l'industrie locale de ces filières. [78]

I.6.7.6. Chauffe-eau solaire :

Ce programme vise l'introduction des chauffe-eaux solaire dans le résidentiel et le tertiaire pour les besoins de chauffage de l'eau. La généralisation des **CES** reste tributaire d'une baisse des coûts de production qui sera réalisée par le développement d'une industrie locale. [78]

I.6.7.7. Equipement électroménagers :

Les gains d'énergie escomptés par la mise en œuvre du programme de maîtrise de l'énergie nécessitent l'introduction dans le marché algérien des équipements et appareils (climatiseurs, réfrigérateurs,) énergétiquement performants qui ont un impact significatif sur la balance énergétique.

L'Etat vise dans sa stratégie de mise en œuvre de ce programme à booster la fabrication nationale de ces équipements, en accompagnant les industrielles et les fabricants dans le développement du ce marché afin de réaliser un maximum d'intégration. [78]

I.7. Obstacles au développement des énergies renouvelables en Algérie :

I.7.1. Les obstacles politiques :

L'instabilité politique dans la région **MENA** (Middle East and North Africa) risque de retarder ou de freiner le développement des énergies renouvelables, tel a été le constat lors de la 3^{ème} édition de la conférence de Berlin (Allemagne) qui a été du 7 à 8 Novembre 2012. Le développement des énergies renouvelables dans la région **MENA** est tributaire de plusieurs facteurs, pas ceux d'ordre économique ou technique, mais bel et bien d'ordre politique. En effet, l'instabilité politique que vient actuellement plusieurs pays de la région **MENA** conjuguée à une certaine « discordance » enregistré au niveau des pays européens, risque de retarder ou de freiner le développement de ce type d'énergie.

I.7.2. Les obstacles technologiques :

Le développement des énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie solaire de ses deux types (l'énergie solaire thermique et photovoltaïque) et éolien nécessite l'utilisation d'une haute technologie, et une industrie plus développée.

Les ministres Africains de l'environnement ont rappelé que les obstacles technologiques sont à la tête des empêchements qui ont causé le retard de développement des énergies renouvelables en Afrique. Selon Mr YASAA Noureddine, directeur de centre de développement des énergies renouvelables (CDER), « le manque d'expertise et de technicité dans ce secteur nous a poussé à mettre en place un institut sur les énergies renouvelables. Le développement de ce type d'énergie est basé sur l'encouragement des pays Africains à échanger leurs expériences ». [4] L'Algérie manque de ressources humaines adaptées à la nouvelle vision du développement économique durable. Les écoles et instituts de formations spécialisés pour ingénieurs et techniciens spécialisés en énergies renouvelables ont été éliminés. [79]

I.7.3. Les contraintes financières :

Toujours, dans le cadre de la conférence Africaine sur l'économie verte, le représentant de la banque Africaine de développement a signalé que « le financement ne doit pas être un obstacle pour l'économie verte », surtout qu'il existe des projets qui n'exigent pas de gros financements.

De sa part, le ministre Ougandais de l'environnement a ajouté que « le secteur privé et les bailleurs de fond doivent soutenir les programmes pour le développement durable, il est fort possible qu'ils soient financés à 50% par les investisseurs privés pour peu qu'on leur fournisse le cadre qu'il faut, comme dans la téléphonie par exemple. [4]

I.8. Conclusion :

L'existence de réserves de combustibles fossiles est inconnue, car les opérateurs et les experts rapportent des chiffres plus politiques que techniques.

En conséquence, le pic de production du combustible primaire, le pétrole, est attendu entre 2020 et 2050, ce qui pose un problème pour répondre à la demande énergétique mondiale en raison de sa nature non renouvelable. L'importance des énergies renouvelables dans la résolution de ce problème ne peut être surestimée.

Par conséquent, il est essentiel de s'intéresser à cette forme d'énergie à long terme tout en développant les technologies nécessaires pour assurer son utilisation afin d'obtenir un rendement rentable.

En outre, contribuer à l'énergie renouvelable nous permet de maintenir un environnement propre et sûr tout en assurant la protection de la biodiversité. Le gouvernement algérien a réaffirmé son engagement en faveur du développement des énergies renouvelables en lançant une initiative de développement des énergies renouvelables et d'efficacité

énergétique. En conséquence, les Algériens sont plus préoccupés par les sources d'énergie renouvelables.

Ce constat est aujourd'hui devenu réalité à la suite des programmes de formation prévus, de divers projets sur le terrain, et de plusieurs salons nationaux et internationaux organisés en Algérie pour promouvoir l'économie verte et le développement durable.

Toutes ces initiatives témoignent de la volonté du gouvernement algérien d'investir dans cette nouvelle infrastructure, notamment parce que le pays possède l'un des plus grands potentiels d'énergies renouvelables au monde.



Chapitre II

Dimensionnement et modélisation des micro-réseaux électrique

II.1. Introduction :

Plus d'un milliard de personnes n'ont toujours pas accès à l'électricité et beaucoup d'autres n'ont pas de réseau électrique fiable. À l'heure actuelle, la technologie permet l'utilisation de micro-réseaux hybrides capables de produire et de stocker de l'électricité distribuée. Ces micro-réseaux hybrides apportent une valeur ajoutée en combinant des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, avec des groupes électrochimiques. En conséquence, vous aurez une source d'énergie fiable, durable et rentable. [80]

Les Micro réseaux (**MR**) attiré l'attention en raison de leurs avantages significatifs pour les consommateurs d'électricité et les exploitants de réseaux électriques [81] et en raison de l'évolution de ces nouvelles structures des systèmes électriques qui doit être envisagée pour répondre aux nouveaux défis de la production décentralisée et pour exploiter, d'une manière optimale, le potentiel des technologies basées sur des nouvelles sources énergétiques.

Cette évolution passe par l'utilisation de nouveaux matériels, comme l'électronique de puissance, les réseaux de communication, des technologies de stockage, etc. [82]

Les **MR** sont fiables pour améliorer la qualité de l'énergie, réduire les émissions, réduire la congestion du réseau et les pertes d'énergie, augmenter l'efficacité énergétique et potentiellement améliorer l'économie du système. Ils pourraient également éliminer les investissements dans des installations de production et de transmission supplémentaires pour fournir des charges à distance. En outre, la capacité d'îlotage de **MR** en cas de pannes ou de perturbations dans les réseaux en amont améliorerait la fiabilité et la résilience du réseau et des clients. [81]

Notre étude dans ce deuxième chapitre est consacrée à trois parties :

1. La première partie définit le micro-réseau électrique avec ses types, ses structures et niveaux de contrôle.
2. La deuxième partie présente la modélisation d'un **MR** et une présentation détaillée sur les systèmes hybrides.
3. La troisième partie présente l'étude de l'impact des énergies renouvelables sur le micro-réseau électrique et pour finir nous avons exploitation et maintenance de **MR**.

II.2. Définition d'un micro-réseau :

Un Micro-réseau (**MR**) est un réseau électrique de petite taille, conçus pour fournir un approvisionnement électrique fiable et de meilleure qualité à un petit nombre de consommateurs. Il agrège de multiples installations de production locales (petits générateurs

diesel, panneaux photovoltaïques, éoliennes, petite hydraulique), des installations de consommation, des outils de contrôle, de supervision et de gestion des données, de systèmes de contrôle, et enfin des systèmes de stockage de l'énergie.[83] Ce **MR** permet d'assurer l'alimentation de « sites » de différentes natures : îles, campus, aéroports, zones industrielles, écoquartiers, communautés résidentielles, etc. Ces sites peuvent être isolés (zones isolées, sites industriels) ou être par ailleurs connectés à un réseau de distribution régional/national. Dans les zones connectées, un **MR** est caractérisé par sa capacité à s'isoler du réseau et à fonctionner en autonomie (en « îlotage ») pendant au moins plusieurs heures. [82] Alors, il peut fonctionner sur les deux modes connectés au réseau (synchrone avec le réseau), ou en mode îlot (fonctionnement autonome et déconnecté du réseau principal réseau électrique) selon les conditions physiques et/ou économiques.

Une disposition typique de **MR** est illustrée sur la figure II.1.

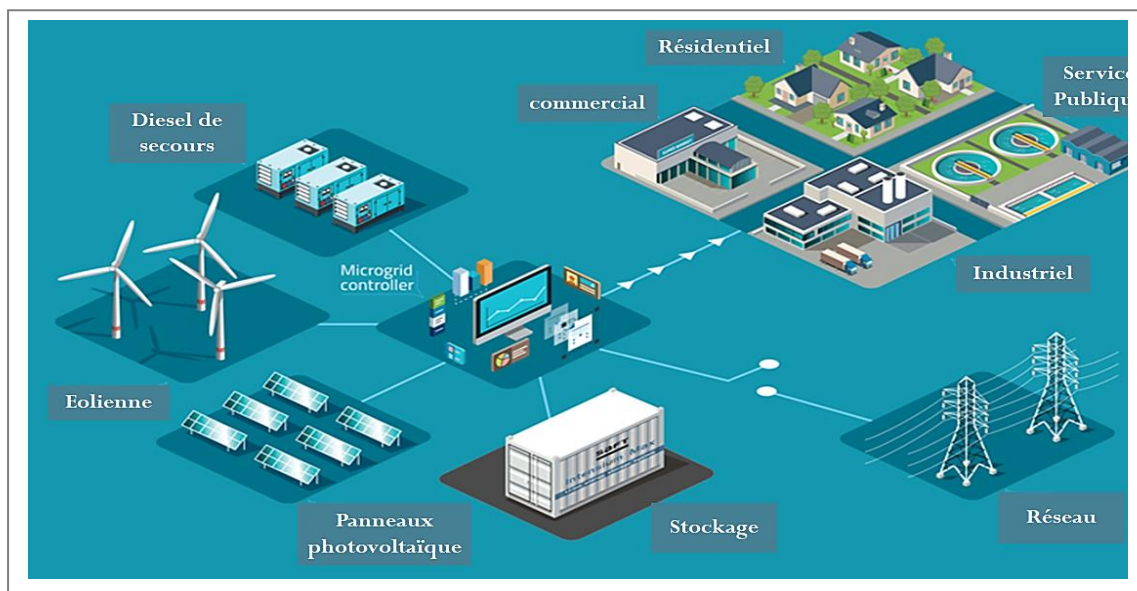


Figure II.1: Architecture d'un **MR**. [85]

Il a été décrit comme une " nouvelle architecture de réseau de distribution au sein du concept de réseau intelligent plus large, qui est capable d'exploiter plus pleinement toute la gamme des avantages découlant de l'intégration de grand nombre de **DER** à petite échelle dans des systèmes de distribution d'électricité à relativement basse tension.

Actuellement, la majorité des **MR** du monde se trouvent en Amérique du Nord et dans la région de l'Asie et du Pacifique comme montré dans la figure II.2.

La majeure partie de la capacité de la région Asie-Pacifique provient de la République populaire de Chine. Bien qu'il n'y ait pas de registre central, un tracker semestriel estime 1869 **MR** d'une capacité totale de 20,7 **GW** au quatrième trimestre de 2017.

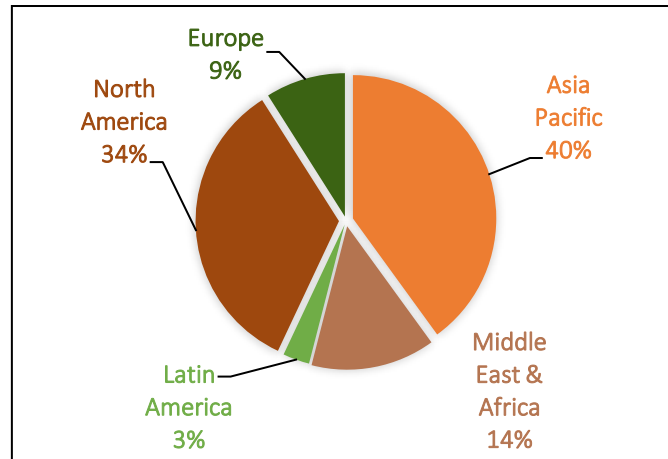


Figure II.2 : Part de la capacité des MR par Région, Quatrième trimestre 2017. [86]

Dans les années à venir, les MR devraient connaître une croissance significative dans le monde entier, en particulier dans la région de l'Asie et du Pacifique et en Amérique du Nord, avec les dépenses devraient augmenter environ cinq fois de 2018 à 2027. Cela nécessitera une augmentation financement provenant de diverses sources et instruments, y compris de sources privées et gouvernementales. [86]

La figure II.3 montre les capacités et dépenses annuelles des MR.

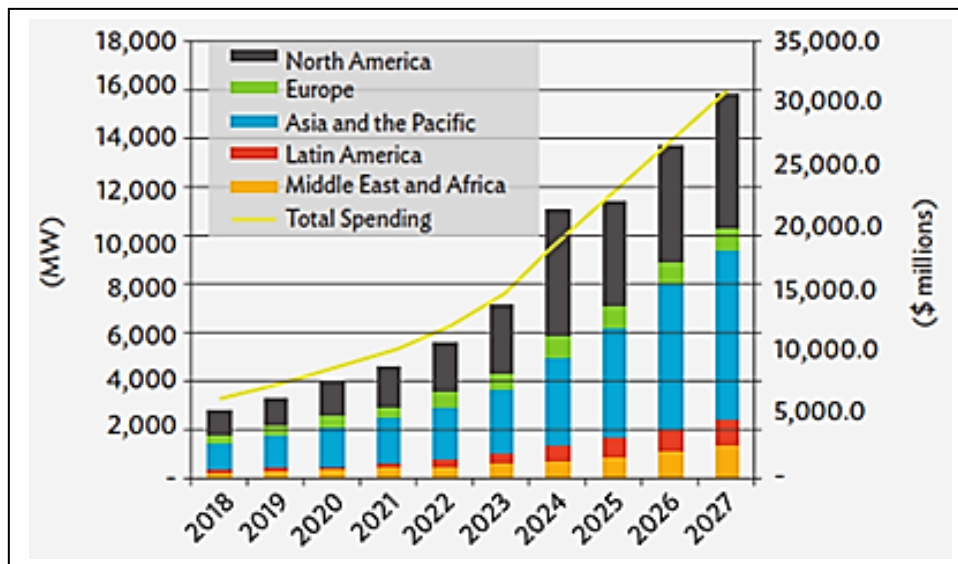


Figure II.3 : Capacité et dépenses annuelles des MR, scénario de base 2018-2027. [86]

Le tableau II.1 dresse une comparaison des fonctionnalités des réseaux classiques et des réseaux intelligents.

Tableau II.1 : Comparatif des fonctionnalités d'un réseau électrique classique et d'un réseau Intelligent. [87]

Fonctions	Réseaux classiques	Réseaux intelligents
Production	<ul style="list-style-type: none"> • Massive et localisée quelques unités de grande capacité très distantes des exploitations. • Hydroélectrique, thermique, thermonucléaire, à cycle combiné. • Éloignée de l'exploitation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuée : Un grand nombre d'unités de grande, moyenne et petite capacités dont certaines sont proches des exploitations. • Classique + éolienne, photovoltaïque, hydrolienne, biomasse, géothermique. • Proche de l'exploitation
Transport	<ul style="list-style-type: none"> • Longues lignes hautes tensions (CA ou CC) • Unidirectionnelle de la sous-station vers les clients • Architecture radiale 	<ul style="list-style-type: none"> • Courtes lignes moyenne et basse tension • Bidirectionnelle les clients sont actifs et peuvent produire de l'énergie pour renforcer le réseau. • Architecture maillée
Distribution		
Supervision	<ul style="list-style-type: none"> • Centralisée et exclusive : Des capteurs et des actionneurs disséminés dans le transport fournissent des informations à la base via un système de type SCADA. • Étendue et globale nécessite parfois une couverture satellitaire, ce qui augmente la latence et la réactivité. 	<ul style="list-style-type: none"> • Décentralisé et inclusive : De petits sous-réseaux (sources, transport et charges locales) sont supervisés et peuvent s'agréger à des ensembles plus grands • Locale emploie les Ethernet, wifi, protocoles TCP/IP, etc., assurant une bonne qualité de service avec des temps de latence réduits.
Stockage d'énergie électrique	<ul style="list-style-type: none"> • Non viable économiquement : La puissance est produite à la demande dans l'optique de stabiliser le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> • Pratiquement indispensable il faut tirer le meilleur des sources renouvelables (intermittentes) en stockant les excédents.
Contrôles et Régulations	<ul style="list-style-type: none"> • Limités à la production et au transport. • Manuels et semi Automatiques. 	<ul style="list-style-type: none"> • Omni présents, de la production à l'exploitation. • Entièrement automatisés.

<p>Commutations et Reconfiguration Dynamiques</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Risques d'instabilité et de pannes générales. 	<ul style="list-style-type: none"> •Possibilité de fonctionner en mode connecté ou isolé. •Déconnexion/reconnexion automatique et transparente (plug and play) : Les véhicules électriques sont appelés à jouer des rôles de plus en plus importants
<p>Interopérabilité</p>	<ul style="list-style-type: none"> •Quasi inexistante : Relations de verticalité ou échanges très restreints avec les autres acteurs du marché de l'énergie. 	<ul style="list-style-type: none"> •Poussée au maximum : Prévois des interfaces d'échanges mutuels (en temps réel) avec les autres acteurs du marché de l'énergie.

II.3. Applications :

À chaque cas d'usage son **MR** : Il serait presque plus simple de définir les **MR** par leurs usages comme indique le tableau II.2.

II.3.1. MR isolés :

La plus simple expression du **MR** est parfaitement illustrée par les projets d'accès à l'énergie : par exemple un panneau **PV**, un onduleur, une batterie, quelques prises et une ampoule. Même à l'échelle d'une petite communauté, ou encore d'une île entière, ces réseaux restent autonomes, sans connexion à un réseau électrique plus vaste.

II.3.2. MR îlotables :

Plus compliqués à opérer, les **MR** îlotables (c'est-à-dire reliés au réseau principal en régime normal, mais déconnectables) offrent des services proches de ceux d'un "vrai" réseau de distribution comme la résilience ou une bonne qualité de courant. "Ces réseaux intéressent des acteurs comme les militaires pour leur autonomie ; les hôpitaux ou les data center pour la disponibilité 24 heures ; ou encore des opérateurs de réseaux de distribution dont certaines parties sont difficiles à gérer ou géographiquement éloignées du réseau principal, et qui pourraient à terme "effacer" une poche entière de leur réseau et éviter de lourds investissements pour seulement quelques périodes de pointes.

II.3.3. MR multi-énergies :

L'adjonction de réseaux de chaleur ou de froid, permet d'étendre les fonctionnalités techniques, à commencer par l'adjonction d'**ER** spécifiques (la biomasse ou la géothermie par exemple), ou la récupération de chaleur fatale. "On élargit alors le champ d'action, et donc

l'efficacité du pilotage. Il devient possible d'optimiser l'efficacité énergétique et les échanges entre acteurs d'une même zone. Les clients finaux de ce type de réseaux : des hôpitaux, des campus universitaires, des ports, des plaques industrielles. [88]

Tableau II.2 : Applications des MR. [88]

Classification des MR	MR isolés	MR connectables et îlotables	MR multi énergies
Applications	<ul style="list-style-type: none"> • Systèmes Solaires Domestiques • Électrification rurale • Petites îles 	<ul style="list-style-type: none"> • Îles • Sites industriels • Sites militaires • Hôpitaux, data centers. • Réseaux de distribution existants 	<ul style="list-style-type: none"> • Campus • Plaque industrielles • Ports
Puissance	De quelques Watts à 10 MW	500kW < > 10 MW	> 10 MW

II.4. Composants d'un micro-réseau :

Un **MR** comprend typiquement un ou plusieurs des systèmes représentés sur la figure II.4 :

1. Des centrales ou microcentrales de production d'énergie, qui peuvent exploiter des ressources primaires renouvelables locales, ou d'autres ressources importées telles que le diésel.
2. Un système de distribution et éventuellement de transport sur de courtes distances de l'énergie produite.
3. Des dispositifs d'électronique de puissance destinés à la conversion et au transfert de l'énergie électrique d'un niveau du système à l'autre.
4. Un ou plusieurs moyens de stockage de l'énergie produite, nécessaire afin de fournir de l'énergie lors des périodes de forte demande.
5. Des moyens de stabilisation de l'électricité du **MR**, pouvant être des compensateurs statiques (**STATCOM**) ; ou plus récemment, l'utilisation de systèmes de stockages à batterie électrochimique comme outil de compensation de l'énergie active et réactive.
6. Des consommateurs locaux, qui peuvent nécessiter une alimentation en courant alternatif (**CA**) ou continu (**CC**), dont la répartition dans le **MR** et les exigences de qualité sont des contraintes majeures pour les opérateurs.

7. Optionnellement d'un moyen de connexion et de déconnexion du réseau électrique principal de forte puissance. [9]

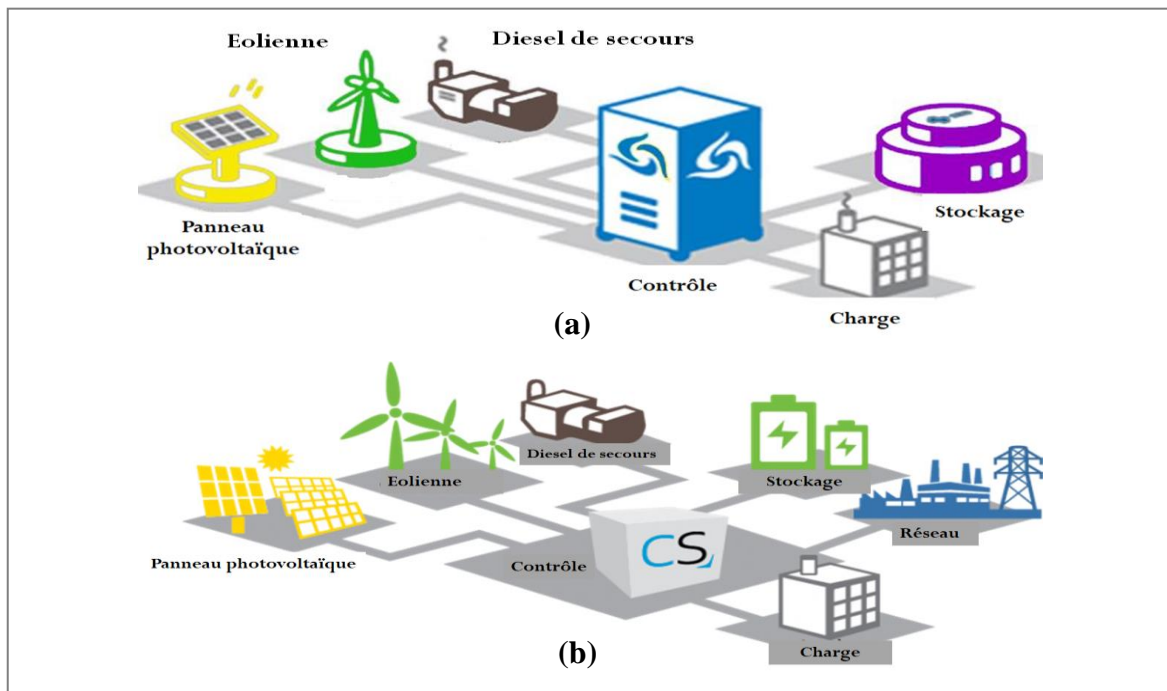


Figure II.4 : Composants d'un MR ; (a) : isolé, (b) : connecté au réseau. [89]

II.5. Principe de fonctionnement d'un MR :

Il y a quatre modes de fonctionnement ont été identifiés à savoir : le mode connecté au réseau, la transition au mode autonome, le mode autonome et le mode de reconnexion. [90]

II.5.1. Mode connecté au réseau électrique :

Le MR est connecté au réseau principal selon ses besoins d'énergie, il peut recevoir partiellement ou totalement l'énergie ou envoyer l'excédent de son énergie électrique au réseau principal lorsque sa production totale dépasse la consommation. Dans ce mode il est conseillé que la mesure, l'échange d'information et le contrôle d'équipement du système autonome soient fonctionnels y compris le système de protection pour fournir les informations du niveau de production, les charges locales et les tensions du système, pour que la transition puisse être planifiée à l'avance. [90]

II.5.2. Transition vers le mode autonome :

Il est conseillé que le **DER** soit disponible pour soutenir la tension et la fréquence du système durant un laps de temps pendant que les dispositifs d'interconnexion et de protection prennent le relais pour effectuer une transition réussie. [90]

II.5.3. Mode déconnecté du réseau électrique :

Lorsque le réseau électrique en amont rencontre un problème, où il y a des actions prévues (par exemple, afin d'effectuer des opérations de maintenance), le **MR** peut facilement se déconnecter du réseau principal et rester opérationnel et fonctionnel comme une entité autonome pour alimenter les charges locales.

Dans ce mode les **DER** devront avoir une marge de réserve suffisante qui est en fonction du facteur de charge, l'amplitude de la charge, le type de la charge, les exigences de fiabilité de la charge, ainsi que la disponibilité du **DER**. Pour équilibrer la charge et la génération dans le mode autonome, plusieurs techniques sont suggérées dans la littérature telle que le suivi de charge (en anglais load-following), la gestion de la charge (en anglais load-management) et le délestage de charge (en anglais load-shedding).

En outre, il est souligné que la stabilité transitoire devrait être maintenue pour les variations de la charge, une unité **DER** en panne, et les défauts en mode autonome. Il est également suggéré que le relais adaptatif peut être mis en œuvre pour assurer une protection adéquate pour une variété de modes de fonctionnement du système. [90]

II.5.4. Mode reconnexion au réseau :

Pour la reconnexion du système autonome au système de puissance électrique **EPS**, la surveillance doit indiquer que les conditions appropriées existent pour synchroniser le système autonome au **EPS**.

Il est conseillé qu'après une perturbation dans **EPS**, aucune reconnexion ne doit avoir lieu jusqu'à ce que la tension de l'**EPS** soit dans les normes. La gamme de fréquences se situe entre 59,3 Hz à 60,5 Hz. En outre, la tension de phase, et la fréquence entre les deux systèmes devrait être dans des limites acceptables afin d'initier une reconnexion. [90]

II.6. Types de micro-réseaux :

Selon la connexion, les **MR** sont divisés en trois types :

- Micro-réseau CA
- Micro-réseau CC

- Micro-réseau hybrides couplés CA et CC

II.6.1. Micro-réseau connecté au bus CA :

Ces architectures tirent avantage de l'infrastructure déjà existante (disjoncteurs, transformateurs, génératrices synchrones, etc.) des réseaux CA classiques. Ainsi, les sources traditionnelles telles que le diesel et l'hydroélectrique sont directement connectées au bus principal de transfert d'énergie et constituent la base du MR.

Les sources renouvelables sont intégrées graduellement pour réduire la part des sources les plus polluantes (ou dispendieuses) et nécessitent en général des convertisseurs de puissance.

[87]

La figure II.5 montre la structure typique du MRCA connectée aux charges, sources et au réseau électrique principal.

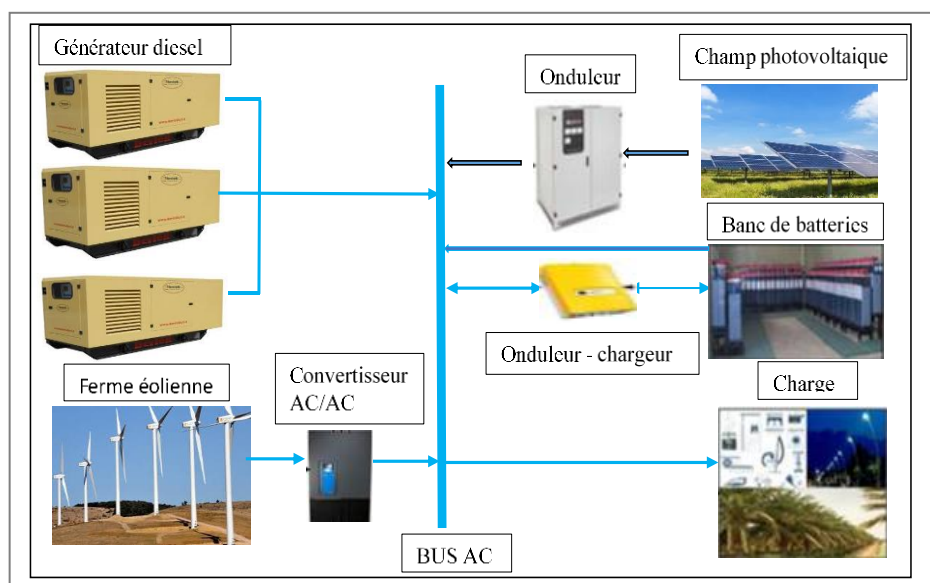


Figure II.5 : Structure d'un MRCA. [91]

Lors de l'utilisation d'un MRCA, il n'est pas nécessaire de reconfigurer les charges ou le système de puissance de l'installation. Cela implique que les charges AC sont directement connectées au MRCA sans aucune nécessité de conversion de puissance via une interface de conversion CA-CC.

En outre, il contribue à la stabilité du réseau utilitaire en offrant un support de puissance réactif pour l'équilibrage et les services auxiliaires. En vue de pouvoir partager, il existe de nombreux contrôleurs qui ont été développés dans le but de maintenir la stabilité dans le MRCA. La boucle de partage de puissance entraîne la stabilité du MRCA. [83]

Le tableau II.3 représente quelque les avantages et les inconvénients de MRCA.

Tableau II.3 : Les avantages et les inconvénients MRCA. [92]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité d'augmenter la tension alternative avec un composant passif (le transformateur) • Appareillage moins cher qu'en courant continu et disponible facilement • Possibilité d'utiliser la fréquence comme moyen de réglage. 	<ul style="list-style-type: none"> • Pertes de puissance multiples dues aux nombreux convertisseurs. • Utilisation de plusieurs convertisseurs (coute élevé des équipements). • Obligation de synchroniser toutes les sources alternatives (utilisation d'un bus de communication par exemple).

II.6.2. Micro-réseau connecté au Bus CC :

Compte tenu de la multitude d'onduleurs requis pour adapter les nouvelles technologies de production et de stockage au bus principal des MRCA, l'objectif principal des MRCC est de réduire les coûts et les pertes en supprimant les interfaces CA (Onduleurs et filtrages CA).

Par ailleurs, ces structures éliminent la nécessité de synchroniser les différentes sources et permettent une meilleure intégration des sources renouvelables.

La figure II.6 montre une structure typique d'un MRCC. [87]

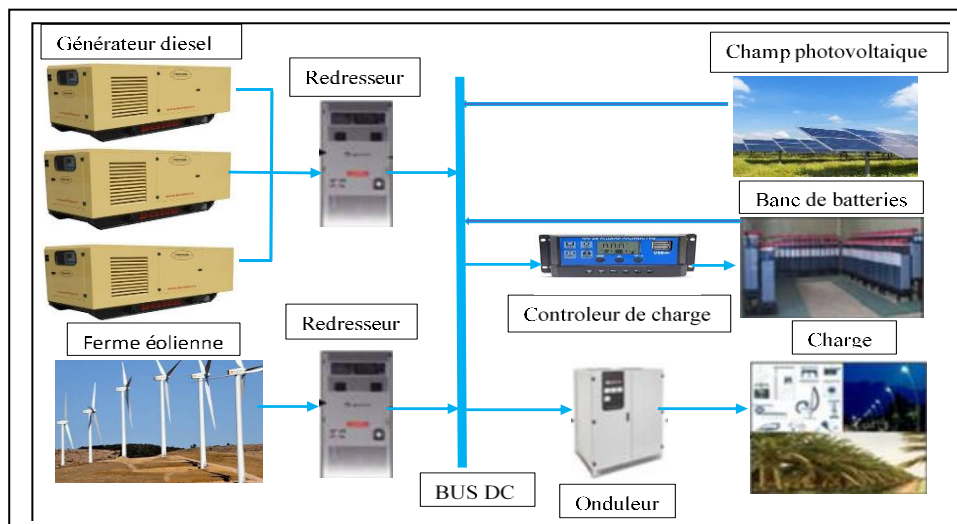


Figure II.6 : Structure d'un MRCC. [91]

La plupart des systèmes DG utilisés dans un MR sont tels que des unités photovoltaïques, des piles à combustible...etc. Ces sources DG ainsi que les unités de stockage ont généralement une tension de sortie continue CC, donc le raccordement avec le MRCC va nécessiter

uniquement un régulateur de tension par rapport à un **MRCA** qui doit en outre synchroniser le système en associant l'amplitude de la tension, la phase et la fréquence à la grille.

La plupart des charges connectées à un **MRCC** sont des charges classiques, généralement des appareils électroniques, des téléviseurs, des ordinateurs, des lampes fluorescentes, des variateurs de vitesse, et des appareils industriels. Ainsi, le fait d'être connecté à un **MRCC** ne nécessite pas de multiples conversions des étages de puissance, comme **CA** au **CC**, **CC** au **CA** ou **AC** au **CC** au **AC**, comme cela serait requis dans un **MRCA**.

Un **MRCC** n'utilise pas de transformateurs ; ce qui le rend plus efficace, de plus de petite taille et fiable pour les systèmes **CC**. En outre, un **MRCC** ne nécessite qu'un câble à deux fils, tandis qu'un micro réseau **CA** exige trois ou quatre fils.

Le flux de puissance réactif n'existe pas dans les micros réseaux **CC**, de sorte que le contrôle de la tension est concerné par le flux de puissance actif, tandis que dans un **MRCA**, la commande de tension est liée au flux de puissance réactive et de la puissance active injectée principalement pour délimiter l'angle de déphasage.

Cependant, un **MRCC** a toujours plusieurs défis à surmonter. Il n'est pas bien développé pour gérer les conditions de panne et de manque d'équipements de protection de base comme les disjoncteurs, les fusibles et les relais de protection, comme il existe dans les réseaux électriques **CA** . En plus, il est très coûteux de mettre en œuvre le système de protection actuel d'un **MRCA** et de le rendre compatible avec un **MRCC**. [83]

Le tableau II.4 montre que les avantages et les inconvénients **MRCC**.

Tableau II.4 : Les avantages et les inconvénients **MRCC**. [92]

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> • Possibilité d'utilisation directe des sources de production. • Peu de pertes. • Peu d'équipements. • Facilité d'extension. 	<ul style="list-style-type: none"> • Nécessite l'ajout d'onduleur ou l'augmentation de la capacité de l'onduleur en cas de forte demande. • Cout élevé de l'appareillage de connexion et de protection en CC. • Perte de disponibilité pour AC en cas de panne de l'onduleur.

II.6.3. Micro-réseau hybride CA/CC :

Dans les **MRCA**, les sources de génération **CC** comme **PV**, piles à combustible sont convertis en **CA** avec l'utilisation de convertisseurs **CC / CA**, tandis que les sources de

production **CA** sont directement alliées avec l'utilisation d'interfaces électroniques de puissance. Considérant que, dans le cas de **MRCC**, les sources de génération **CA** sont converties en courant continu en utilisant Convertisseurs **CA / CC**.

Cependant, ces multiples conversions résultent des pertes. Une solution immédiate aux problèmes mentionnés ci-dessus est un **MRH**, qui minimise plusieurs conversions et réduire les pertes. Les deux notables et les principaux aspects étroitement associés concernant les systèmes hybrides sont la valeur de puissance électrique et la cohérence du système. [93]

Un **MR** hybride se compose d'une combinaison de **MRCA** et **MRCC**. L'électronique de puissance bidirectionnelle est utilisée pour concevoir le système d'un **MR** hybride. Les avantages de cette combinaison :

Les charges **CA** ou **CC** peuvent être fournies sans avoir besoin d'une interface de conversion supplémentaire, ce qui augmente l'efficacité et la fiabilité du système. Cependant, l'inconvénient de système est la nécessité d'un algorithme de contrôle optimal afin d'assurer une performance stable. La structure de **MRH** est illustrée dans la figure II.7. [83]

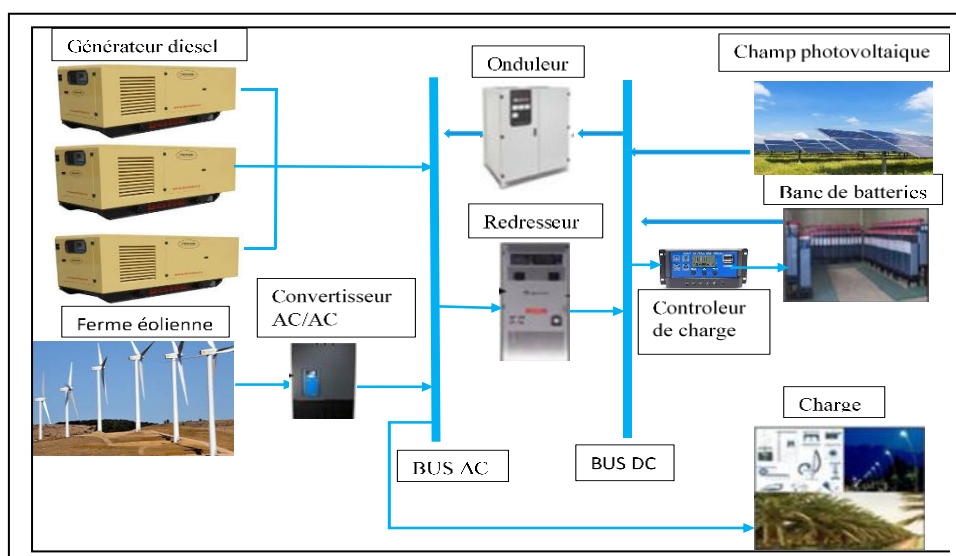


Figure II.7 : Structure d'un **MRH**. [91]

À Partir de la figure II.7, le **MRH** est connecté au réseau par un interrupteur d'isolement, ce qui permet d'isoler le **MRH** pendant les périodes défectueuses. La Maintenance de l'équilibre entre le réseau hybride et le réseau est modérément facile dans mode connecté au réseau par rapport au mode isolé en raison du comportement infini du bus du réseau qui est capable d'absorber ou d'alimenter le **MRH**.

Dans le cas de mode isolé, le **MRH** n'est plus connecté au réseau. Par conséquent, le **MRH** lui-même doit fournir la charge totale demandé par Convertisseur bidirectionnel.

Le meilleur plan possible des systèmes doit être rentable et cohérent, et il peut être accompli avec le bon choix de l'appareil du système. Ainsi, une optimale méthode de dimensionnement est obligatoire pour proposer un compétent et rentable système de **MRH**. [93]

Les avantages et les inconvénients **MRH** sont classés dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Les avantages et les inconvénients **MRH**. [92]

Avantages :	Inconvénients :
<ul style="list-style-type: none"> • Bon rendement. • Possibilité de connecter directement la charge. • Moins de contrainte sur l'onduleur. • Possibilité d'alimenter des charges à partir d'une source importante AC. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baisse de rendement en matière de consommation de carburant en cas de charge partielle

II.7. Classification de micro-réseau :

Les **MR** peuvent être classés en fonction de leur taille, mais également de leur utilité (fiabilité, résilience et efficacité des réseaux, difficulté d'accès à l'énergie, conditions météorologiques dégradées, émergence d'écoquartiers, économies d'énergie, etc.) en cinq grandes catégories :

II.7.1. Les MR des zones commerciales, artisanales ou industrielles :

Ces zones consomment une grande puissance d'électricité, regroupent entreprises et industries aux activités diverses, dont les besoins en énergie ne sont pas tous identiques. Il s'agit d'y optimiser la gestion de l'énergie pour qu'elles soient plus neutres vis-à-vis du réseau de distribution. [83]

II.7.2. Les MRs de campus universitaire :

L'enjeu est d'améliorer la gestion énergétique des campus dans un contexte où ceux-ci se doivent de réduire leur consommation d'énergie. En même temps, la construction des **MRs** sur les campus offre aux chercheurs et ingénieurs des laboratoires en taille réelle pour étudier les différentes problématiques liées au développement et au déploiement des réseaux électriques intelligents. [83]

II.7.3. Les MRs alimentant des zones isolées car faiblement ou non raccordées aux réseaux électriques ou temporairement coupées du réseau pour cause d'intempéries :

Le déploiement des **MRs** leur permet d'exploiter les ressources énergétiques renouvelables locales et de ne plus dépendre de groupes diesel polluants et coûteux. Les **MRs** permettent également à des villes touchées par des intempéries d'éviter d'être totalement privées d'électricité. [83]

II.7.4. Les écoquartiers :

Ils fonctionnent plus ou moins sur le même modèle que les **MRs** dans les zones commerciales ou industrielles. [83]

II.7.5. Les MRs de campus militaire ou hôpital :

Avec ses propres moyens de production et de stockage et ses propres infrastructures de distribution, le **MR** garantit une autonomie énergétique fournissant de l'électricité pendant les périodes de coupures de courant sur le réseau de distribution, atout essentiel pour les bases militaires ou les hôpitaux, qui ne peuvent pas laisser des pannes d'électricité les empêcher de s'acquitter de leurs missions. [83]

II.8. Technologies des Micro-réseaux :

Avec les nouvelles technologies de l'information et de la communication il s'agit maintenant de doter chaque système de solutions de gestion active (introduction d'outils de mesure et de contrôle et optimisation). [94]

II.8.1. Outils de mesure :

II.8.1.1. Capteurs :

Les **MR** permettront une interaction entre les différents acteurs (producteurs, consommateurs, gestionnaires de réseau) d'une grande souplesse pour assurer un approvisionnement en électricité, efficace, durable, économique et sécurisé.

L'installation d'un grand nombre de capteurs, repartis judicieusement sur le réseau, et le déploiement généralisé de compteurs communicants permettront d'avoir une perception dynamique et précise des charges et de la production en tout point du réseau, mais également d'avoir une meilleure information sur les différents événements survenant sur celui-ci, comme, par exemple, une dégradation de la qualité de l'onde de tension.

Toutes ces informations permettront une meilleure gestion du réseau. En particulier, les compteurs communicants vont jouer un rôle important dans le développement des MR, dont ils sont la première brique, pour la maîtrise de l'énergie et l'ouverture à la concurrence. [94]

II.8.1.2. Compteurs intelligents :

Les développeurs des offres de compteurs communicants et des systèmes répondant aux besoins de tous les acteurs amenés à intervenir sur les réseaux intelligents :

- **Les opérateurs de réseau :**

Ils pourront intégrer les informations de comptage intelligent en temps réel à leur centre de contrôle pour permettre une modélisation plus fine du réseau et de la demande, en lien avec les différents usages.

- **Les fournisseurs :**

Ils leur fourniront un accès plus fréquent aux profils de consommation de leurs clients, leur permettant de développer de multiples offres de prix et de services.

- **Les consommateurs :**

Ils pourront obtenir un accès immédiat à des informations sur leur consommation. Ils pourront connecter leur système comptable au système de gestion de l'énergie et obtenir un affichage en temps réel des informations s'ils le souhaitent.

L'infrastructure est constituée de concentrateurs de communication et de données reliés à un système d'information capable de traiter et de modéliser les données générées, ainsi que de technologies de contrôle-commande capables de piloter les contrôleurs. [95]

✚ Selon la complexité du système (ordinateurs – réseaux de communication – système central), un système de comptabilité intelligent peut fournir une variété de fonctionnalités plus ou moins évoluées. Il est possible de citer les exemples suivants :

- La fourniture d'indices à distance à la demande et de manière régulière, permettant une tarification basée sur des indices en temps réel (électricité et gaz) et la facilitation des emménagements, des déménagements et des changements de fournisseurs.
- L'enregistrement, la récupération et la facturation d'une charge, permettant aux distributeurs et aux fournisseurs d'offrir une variété de tarifs (principalement pour l'électricité).
- La gestion dynamique de la puissance souscrite (limitation, changement) (électricité).
- Le couplage et le service à distance (impliquant principalement l'électricité).
- Le passage en mode maintenance (électricité et gaz).

- Détection d'activité frauduleuse (électricité).
 - La mesure de la qualité de l'alimentation (détection de collision) (électricité).
 - Les informations du client, y compris les informations sur sa consommation (électricité, gaz).
 - Gestion de la charge (suppression de distance) (électricité).
- ✚ Ces différentes fonctionnalités visent donc à apporter des bénéfices aux différents acteurs de la chaîne de valeur (gestionnaires d'infrastructure, fournisseurs, producteurs et clients finals) :
- Diminution du coût du service fourni. Diminution de la consommation d'énergie.
 - Amélioration de la sécurité de la chaîne d'approvisionnement et réduction des émissions de gaz à effet de serre (réduction ponctuelle nationale via des taux multi-heures incitatifs et un couplage charge par distance).
 - Facilitation du fonctionnement d'un marché libre.
 - Commercialisation de services à valeur ajoutée).[95]

II.8.2. Systèmes de contrôle et de détection :

Les systèmes de surveillance et de contrôle des **MR (MMCS)** lient tous les composants des **MR** et maintiennent l'équilibre en temps réel de la production et de la charge. Dans les configurations de **MR** les plus élémentaires, le système de contrôle pourrait être simplement un régulateur contrôlant un générateur diesel.

Dans les **MR** plus complexes, le **MMCS** comprend des capteurs, des compteurs, des plates-formes logicielles sophistiquées et des chemins de communication conçus pour permettre l'optimisation et le contrôle en temps réel des générateurs, du stockage d'énergie, des charges et de l'interface des services publics. Pendant le fonctionnement connecté au réseau, le **MMCS** doit gérer l'interconnexion des services publics et communiquer avec le centre d'exploitation du système du service public (ou l'opérateur de système indépendant), y compris tous les systèmes de gestion en temps quasi réel. [86]

La protection est un élément important dans la conception des **MR**. Il est également nécessaire pour le **MR** dans son ensemble comme pour les contrôles de niveau de cycle. Il doit agir presque instantanément et être soigneusement programmé pour différencier entre modes de fonctionnement connectés au réseau et insulaires. Dans un mode de fonctionnement lié à une grille, la protection est simplifiée par les courants de défaut potentiellement importants, alors que ces courants de défaut peuvent avoir des valeurs relativement faibles en mode îlot en raison des interfaces intégrées d'électronique de puissance dans le **MR**.

Cette faible capacité de courant en mode îlot n'est pas suffisante pour déclencher la protection conventionnelle contre les surintensités. Par conséquent, un système de protection adaptatif est nécessaire pour modifier les paramètres du relais en temps réel pour garantir que le **MR** est toujours protégé.

Une autre solution pourrait être utilisation de relais numériques équipés d'un réseau de communication pour protéger le **MR**. Un moyen plus facile d'aborder le problème de protection est de concevoir le **MR** pour, dans une situation de défaut, entrer en mode insulaire avant toute protection l'action prend place. [86]

II.8.3. Stockage d'énergie électrique :

Les **MR** doivent avoir une certaine forme de stockage d'énergie comme moyen de décaler dans le temps leur propre production pour répondre aux demandes de charge, ainsi qu'une alimentation de secours critique en mode îlot.

Avec le stockage d'énergie, le **MR** peut absorber et stocker l'énergie générée lorsque l'offre dépasse la demande, et la restituer ensuite lorsque la demande dépasse l'offre (par exemple, pics nocturnes une fois que la production solaire photovoltaïque n'est pas disponible). Bien qu'il existe certaines inefficacités liées au stockage et aux pertes de ligne, celles-ci sont minimales par rapport à la valeur que le stockage peut fournir. [86]

La technologie de stockage d'énergie est choisie en fonction de la taille du **MR** et du temps de réaction requis. Par exemple, pour les **MR** distants ou les **MR** connectés au réseau plus petits, les batteries sont la technologie de stockage la plus couramment utilisée car la capacité de stockage requise par le **MR** ne justifie pas les coûts plus élevés associés à d'autres technologies de stockage. Les batteries peuvent également être utilisées pour fournir les services auxiliaires requis dans un **MR**.

Les technologies de stockage à grande échelle, telles que le stockage hydroélectrique ou le stockage thermique, bien que moins chères pour les opérations de décalage temporel, ont des coûts initiaux élevés qui rendent leur mise en œuvre dans des **MR** plus petits et difficiles. [86]

La figure II.8 présente une classification des principales technologies de stockage de l'énergie électrique envisagées dans le domaine des **MR**. Les critères utilisés sont le principe physique de stockage (chimique, mécanique ou magnétique) et le temps de déstockage (Décharge). [87]

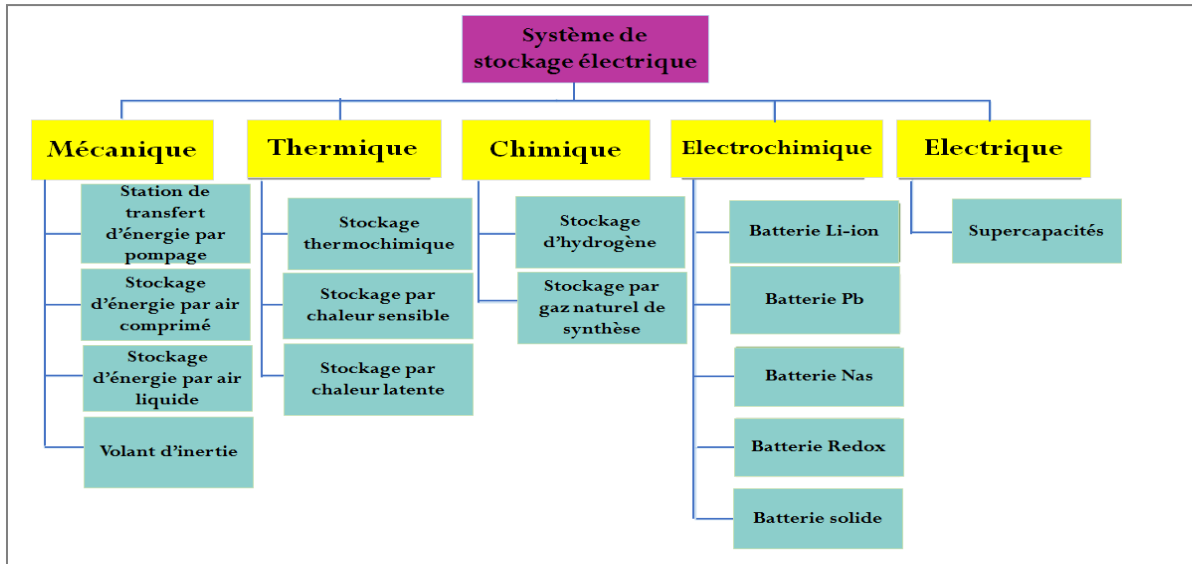


Figure II.8 : Classification des principales technologies de stockage de l'énergie électrique dans le domaine des MR. [96]

II.9. La modélisation du micro-réseau :

Pour être compatible en termes de complexité avec les procédures d'optimisation qui seront développées, le réseau est modélisé à un niveau relativement élevé en flux d'énergie sans tenir compte des tensions/courants et des boucles réglementaires.

Cette représentation simplifiée et compacte est utilisée dans un grand nombre d'études de planification à long et moyen terme. [97]

Le modèle mentionné sur la figure II.9 représente un des plusieurs modèles des micro-réseaux

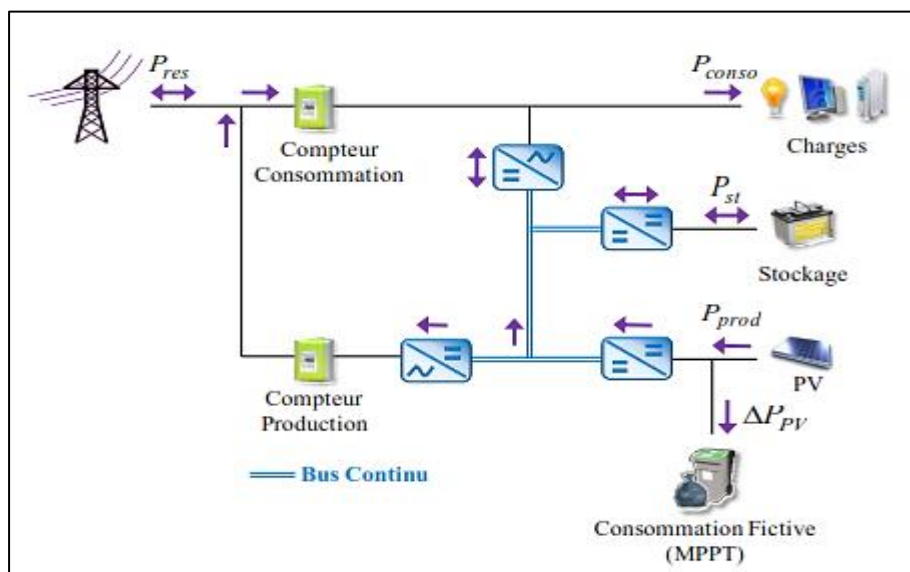


Figure II.9 : Modèle général d'un MR. [97]

Les différentes flèches donnent les contraintes pour les sens de transit. Notons particulièrement les flux.

Tout comme le flux au niveau du stockage P_{st} , le flux pour le réseau principal P_{res} est bidirectionnel avec un sens de transit dépendant du bilan production/consommation au niveau du système global. Les points de consommation sont en convention récepteur et les panneaux PV ainsi que le stockage et le point de soutirage réseau en convention générateur. De cette façon, le bilan de puissance de l'équation II.1, avec prise en compte des pertes doit être respecté à chaque instant. [97]

$$P_{conso} + \Delta P_{pv} + \sum pertes = P_{res} + P_{prod} + P_{st} \quad (II.1)$$

II.9.1. Modélisation de la charge :

Les charges dans un **MR** peuvent être sensibles ou non sensibles à la qualité du signal électrique produit. En outre, chaque type de charge peut être soit électrique, soit thermique.

La puissance est fournie aux charges simultanément par le réseau principal et le **MR** lorsque ce dernier est en mode connecté. Les charges ne reçoivent que la puissance du **MR** lorsque ce dernier fonctionne en mode autonome, ce qui implique une isolation de charge afin que le **MR** puisse maintenir l'équilibre de puissance.

Le point de couplage commun (**PCC**) est un commutateur statique qui joue un rôle d'interface important entre le réseau principal et le micro réseau. C'est le point dans le circuit électrique où le **MR** est connecté au réseau principal.

Il permet au **MR** de se connecter et de se déconnecter du réseau principal lorsque des perturbations se produisent. Il garantit la protection des charges sensibles au **MR** dans les cas suivants :

- La tension s'atténue dans le réseau principal à cause des charges asymétriques.
- La fréquence du réseau principal est hors limites.
- L'injection d'un courant élevé du réseau principal dans le système, provoquant un défaut.
- Mauvaise qualité de tension (perturbations et parasites). [83]

II.9.2. Modélisation de la production décentralisée :

Un contrôle décentralisé a pour but de résoudre le problème de gestion de l'énergie d'un **MR** tout en offrant l'autonomie la plus élevée possible pour différentes unités et charges distribuées. Bien que cette approche puisse encore utiliser une structure hiérarchique pour l'échange de données, les décisions sur les variables de contrôle sont prises localement. L'autonomie est obtenue en utilisant une structure hiérarchique avec au moins 3 niveaux :

opérateur réseau de distribution (**DNO**), contrôleur central de **MR** (**MCC**) et contrôleurs locaux (**LC**).

Le **DNO** est responsable de l'interaction du **MR** avec le réseau de distribution et les **MR** voisins. Le **MRCC** coordonne l'exploitation agrégée des **DER** et des charges à l'intérieur du **MR** et est responsable de leur fonctionnement fiable et économique ainsi que de l'interaction avec le réseau principale.

Ces niveaux de contrôle diffèrent selon leur vitesse de réponse et le délai dans lequel ils fonctionnent, et les besoins en infrastructure (par exemple, les exigences de communication).

Bien que les **MR** ne soient pas nécessairement aussi expansibles géographiquement que les systèmes de fourniture conventionnels, ils peuvent bénéficier de cette hiérarchie de contrôle, représentée sur la figure II.10, en raison du grand nombre de ressources contrôlables et des exigences de performance strictes.

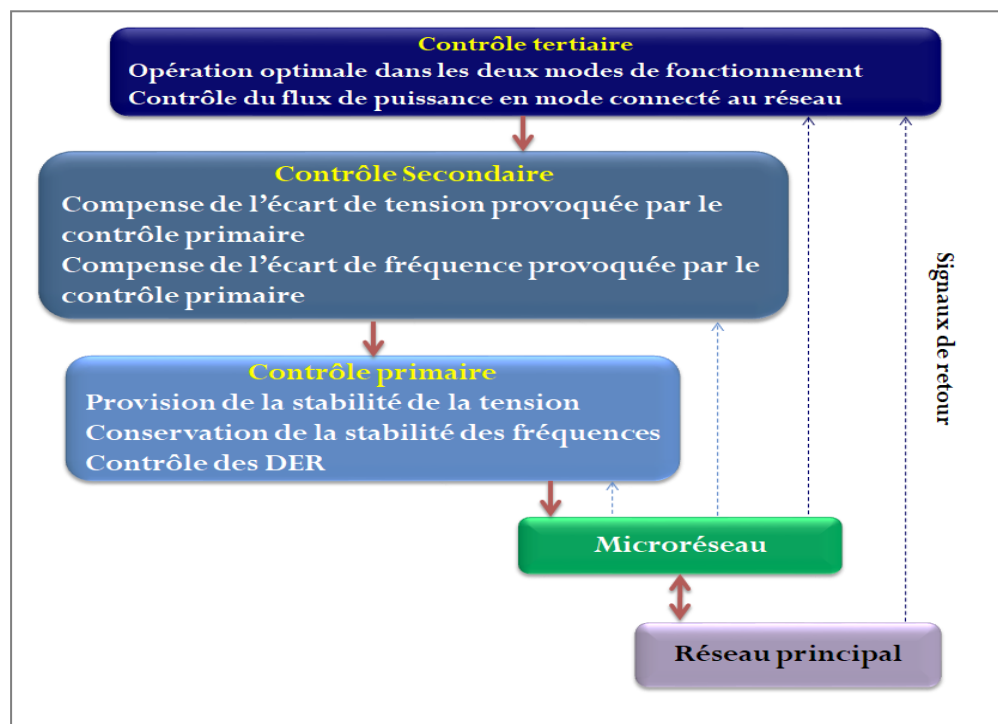


Figure II.10 : Niveau de contrôle d'un MR. [98]

• Contrôle primaire :

Egalement connu sous le nom de contrôle local ou contrôle interne, est le premier niveau dans la hiérarchie de contrôle, avec la réponse la plus rapide.

Il est responsable du contrôle des **DER**, une certaine charge locale, et l'équilibre de la puissance active et réactive.

Compte tenu de leurs exigences de vitesse et de la dépendance vis-à-vis des mesures locales, la détection des îlotages, le contrôle de la production et le contrôle du partage (et de l'équilibre) réseau principal (support de tension, régulation de fréquence, etc.).

Son principal objectif est de réguler la fréquence et la tension des générateurs distribués pour qu'elles ne divergent pas sensiblement de leurs valeurs nominales.

Il a généralement une structure décentralisée, et elle est appliquée localement au niveau de chaque source de production décentralisée.

Lorsque le **MR** fonctionne en mode décentralisé, le contrôle primaire peut prendre certaines décisions et générer les consignes pour le niveau de contrôle interne. Lorsque le contrôle du **MR** est centralisé, le niveau de contrôle primaire reçoit les points de consigne du contrôleur central du **MR**.

Ce niveau de commande fonctionne typiquement dans l'ordre de plusieurs minutes, fournissant des signaux à des contrôles de niveau secondaire sur des **MR** et d'autres sous-systèmes qui forment le réseau complet. [90], [98]

- **Contrôle secondaire :**

Le rôle de cette couche de contrôle est non seulement de restaurer les grandeurs de la tension et de la fréquence et de garantir leur stabilisation dans une gamme spécifique au PCC, mais d'effectuer la gestion d'énergie par le système de gestion d'énergie (en anglais ; Énergie Management Système **EMS**), la synchronisation avec le réseau principal et l'exploitation économique du **MR** soit en mode connecté au réseau et autonomes.

Ce niveau de contrôle est lent et cela permet à la fois d'examiner la dynamique primaire à l'état d'équilibre et aussi d'avoir suffisamment de temps pour effectuer des calculs complexes. [90]

- **Contrôle tertiaire :**

Cette couche de contrôle est le niveau le plus haut dans la hiérarchie de contrôle et elle est généralement conçue pour optimiser les flux d'énergie entre les différents **MR** ou entre un **MR** et le réseau principal. Le contrôle tertiaire facilite la planification de l'exploitation du flux de puissance et la gestion de l'achat et la vente de l'énergie entre les consommateurs ou entre le **MR** et le réseau principal en temps réel.

Il fonctionne typiquement de l'ordre de quelques minutes ou quelques heures. Ce niveau de contrôle est nécessaire uniquement en mode connecté au réseau, car il ne fait pas partie du **MR** lui-même, mais du réseau principal ; pendant le fonctionnement autonome, la coordination la plus haute est généralement réalisée par le contrôle secondaire. [90]

II.9.2.1. Centrale photovoltaïque :

La cellule PV est en général modélisée par une source de courant contrôlée I_{ph} , une diode, une résistance parallèle R_p et une résistance série R_s tel que ceci est représenté dans le schéma de la figure II.11 ci-dessous :

Le courant I_{cell} produit par la cellule est donné par l'équation II.1, η est un facteur d'idéalité dépendant des matériaux utilisés, $K = 1.381 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ est la constante de Boltzmann, $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ est la charge de l'électron et T la température de la cellule en Kelvin.

I_{sat} est le courant de saturation de la jonction PN constituant la cellule et dépend fortement de la température.

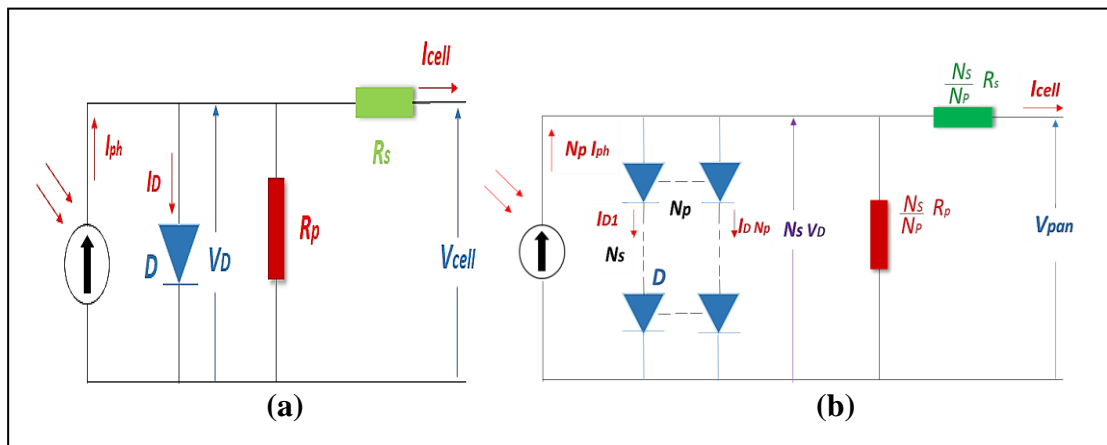


Figure II.11 : Modèles à une diode des générateurs photovoltaïques : (a) Cellule élémentaire ; (b) Panneau constitué de plusieurs cellules. [86]

$$I_{cell} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left[\frac{V_D}{V_T} \right] - 1 \right] - \frac{V_D}{R_p} \quad (II.2)$$

Avec :

$$V_D = V_{cell} + R_s \times I_{cell} \quad \text{et} \quad V_T = \frac{\eta K T}{e}$$

On peut écrire des formules similaires dans le cas d'un module ou d'un panneau possédant un groupement parallèle de N_p blocs, de N_s cellules en série chacun. La tension nominale du panneau est fonction de N_s et le courant nominal est fonction de N_p .

La figure II.12 représente les caractéristiques électriques typiques d'une cellule ou d'un panneau PV. Le courant ou la puissance extractible d'une cellule PV augmente avec le courant I_{ph} qui est lui-même fonction du flux solaire en W/m^2 .

Ces caractéristiques sont altérées par la température T agissant sur le matériau semi-conducteur, donc sur tous les paramètres des modèles de la figure II.11.

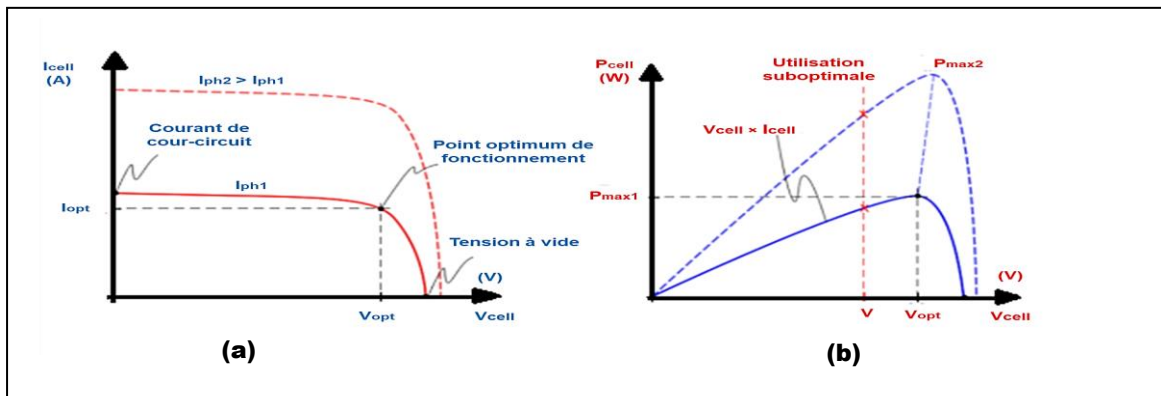


Figure II.12 : Principales caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque : (a) : Courant en fonction de la tension ; (b) : Puissance en fonction de la tension. [87]

Le point d'extraction de la puissance maximale dépend à la fois de la tension, du courant, de l'ensoleillement et de la température.

Pour fonctionner de manière optimale, un panneau PV nécessite une interface d'électronique de puissance chargée de modifier le courant débité de manière à rester sur la caractéristique d'exploitation optimale du générateur PV.

Ainsi, le circuit élémentaire consistant à connecter une cellule PV à une batterie pour la recharger, à travers une diode de protection série, conduit à une utilisation sous-optimale de la ressource solaire.

La structure type d'une microsource PV est schématisée à la figure II.13.

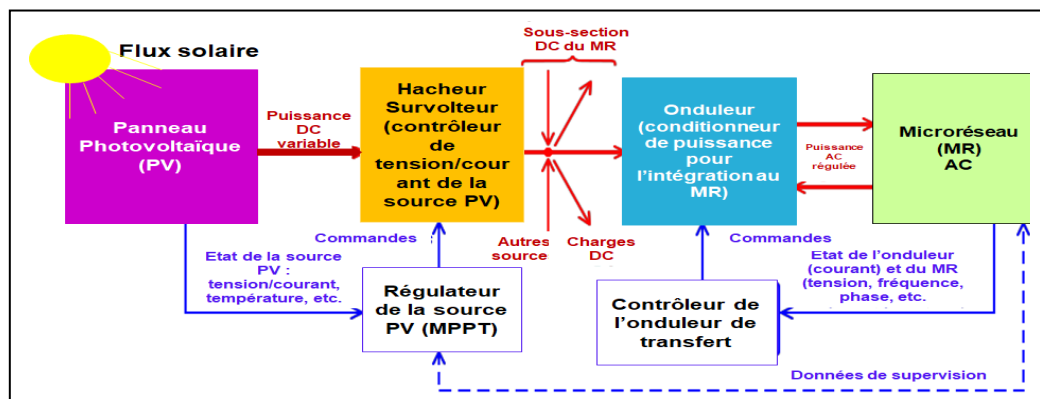


Figure II.13 : La structure type d'une micro-source PV. [87]

L'algorithme de perturbation est une commande **MPPT** qui, combinée à un niveau intermédiaire d'adaptation, permet à un générateur **PV** de fonctionner de manière à produire le maximum de puissance en continu.

En conséquence, quelles que soient les conditions météorologiques, la commande du convertisseur met le système dans le meilleur état de fonctionnement possible. Le type d'adaptation d'impédance le plus courant est un convertisseur **DC-DC**.

Différents algorithmes ont été développés pour suivre le point de puissance optimal d'un module photovoltaïque de manière spontanée. Les algorithmes de contrôle les plus populaires sont :

- L'algorithme de perturbation et d'observation (**P&O**).
- L'algorithme de conductance incrémentale (**INC Cond**).
- L'approche de mesure de la capacité parasite.
- L'algorithme de surveillance de puissance basé sur la tension.
- L'algorithme de surveillance de la puissance est basé sur le courant.
- Approches basées sur l'intelligence artificielle.
- Les réseaux neuronaux.
- L'algorithme de la logique floue. [83]

Extraction du maximum de puissance :

Atteindre le point maximum étant relativement chose complexe, du aux aléas climatiques, on a opté pour la méthode Perturb & Observe (**P&O**) assez simple et efficace. Cette méthode est la plus utilisée dans la littérature rencontrée, mais il en existe d'autres. L'algorithme **P&O** illustré sur la figure II.14.

Cette méthode est basée sur le principe des petites perturbations de la tension du système **PV** à partir de sa valeur initiale, en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur (**DC-DC**).

Parti des valeurs instantanées de la tension et du courant mesurés à la sortie du générateur photovoltaïque, le contrôleur **MPPT** ajuste constamment le rapport cyclique de fonctionnement du convertisseur pour avoir en tout temps le point de puissance maximale. [99]

C'est la méthode la plus répandue dans le milieu industriel, car son algorithme est facile à implémenter. Ce processus fonctionne par une perturbation du système en augmentant ou en diminuant la tension de fonctionnement du module et observer son effet sur la puissance de sortie de la rangée.

L'organigramme de l'algorithme de la méthode (**P&O**), tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de contrôle.

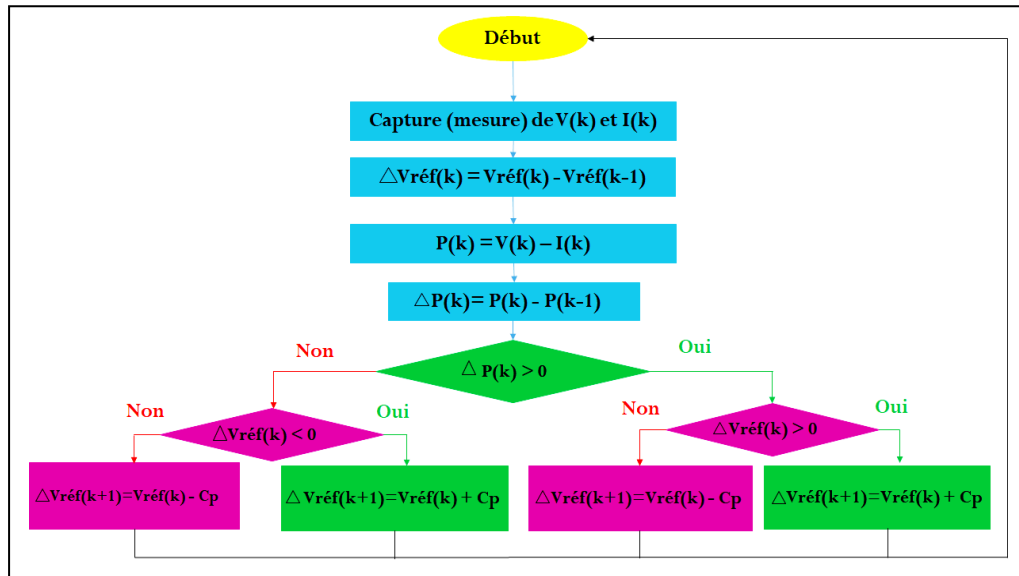


Figure II.14 : Organigramme de l'algorithme MPPT de la **P&O**. [100]

Selon la figure II.14, on mesure la tension et le courant **V** et **I** pour calculer la puissance de sortie courante **P(k)** de la rangée. Cette valeur **P(k)** est comparée à la valeur **P(k-1)** de la mesure précédente.

Si la puissance de sortie est augmentée, la perturbation continuera dans la même direction.

Si la puissance a diminué depuis la dernière mesure, la tension de départ sera décalée dans le sens inverse du cycle précédent.

La tension de fonctionnement **V** est perturbée par cette méthode à chaque cycle **MPPT**. **V** oscillera autour de la tension de fonctionnement idéale **V_{mp}** une fois le **MPP** atteint.

Il en résulte une perte de puissance proportionnelle à la taille du passage d'une simple perturbation **C_p**. [100]

Le schéma de principe de cette méthode est représenté par la figure II.15. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance **P_{pv}** augmente, la direction de perturbation est maintenue ; dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM.

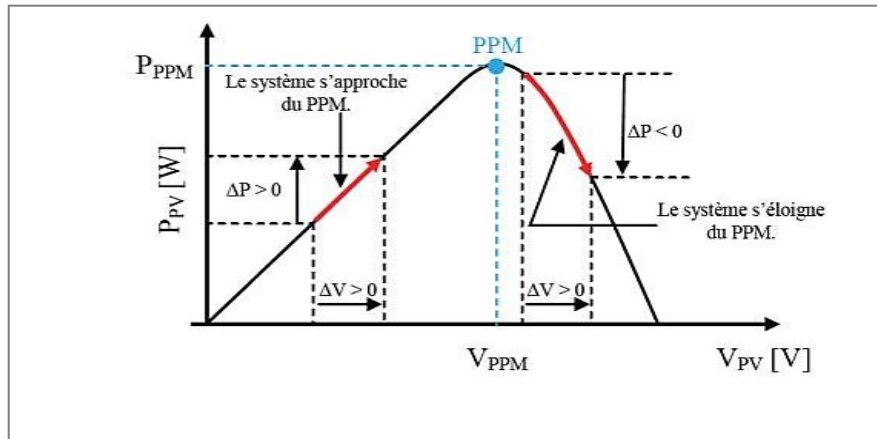


Figure II.15 : Principe de fonctionnement de l'algorithme P&O. [99]

II.9.2.2. Centrale éolienne :

Une éolienne fonctionne en extrayant l'énergie cinétique du vent passant par son rotor. Typiquement, une éolienne est composée d'un rotor, un générateur, trois pales, et un mécanisme d'entraînement.

Comme le vent souffle à travers les pales, la puissance captée par l'éolienne est convertie en énergie électrique par un générateur. L'angle d'inclinaison des pales est contrôlé afin de limiter la puissance de sortie du générateur à sa valeur nominale pour des vitesses de vent élevées. Grâce à une certaine interface électronique de puissance, la puissance est transportée au réseau. [101]

Une éolienne fonctionne en extrayant l'énergie cinétique du vent passant par son rotor. La puissance développée par une éolienne est donnée par l'équation II.3 :

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} \times \mathbf{C}_p \times \rho \times \mathbf{V} \times \mathbf{S} \quad (\text{II.3})$$

Avec : \mathbf{P} : La puissance (W).

\mathbf{C}_p : Le coefficient de puissance.

ρ : La densité de l'air (1.225 kg / m³).

\mathbf{V} : La vitesse du vent (m /s).

\mathbf{S} : La surface balayée par les pales (m²).

La force extraite sur le rotor est proportionnelle au carré de la vitesse du vent et ainsi de l'éolienne doit être conçu pour résister à de grandes forces pendant les tempêtes. La plupart des conceptions modernes sont des rotors à trois pales à axe horizontal car cela donne une bonne valeur du pic \mathbf{C}_p avec une conception esthétique. Le coefficient de puissance \mathbf{C} est une mesure de la quantité d'énergie dont le vent est extrait par la turbine. Il varie en fonction de la

conception du rotor et la vitesse relative du rotor et le vent pour donner une valeur pratique maximale d'environ 0,4.

Le C_p est une fonction du rapport de vitesse de pointe λ et l'angle d'attaque β . Comme le calcul de ce coefficient nécessite la connaissance de l'aérodynamique et les calculs sont assez compliqués, des approximations numériques ont été développés et illustrées par l'équation II.4 :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \times \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21/\lambda_i} + 0.0068\lambda \quad (II.4)$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

La figure II.16 montre le $C_p(\lambda, \beta)$ en fonction de λ caractérisée par rapport aux différentes valeurs de β .

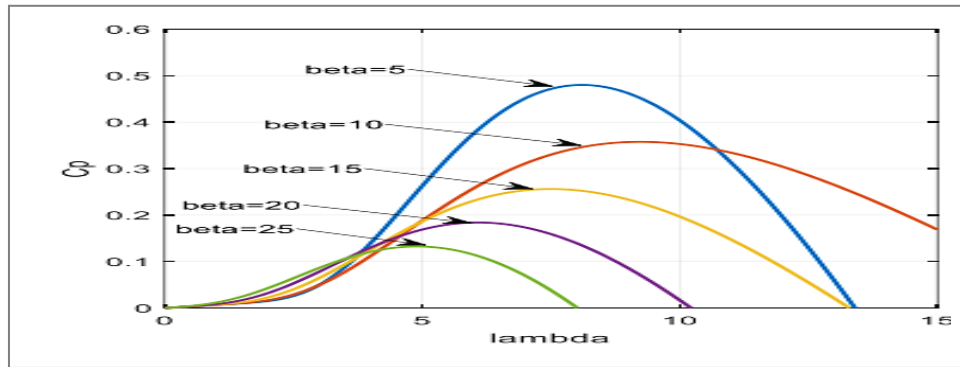


Figure II.16 : Caractéristiques du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$. [101]

Les caractéristiques relatives à la fonction $C_p(\lambda)$ sont utilisées dans la conception du générateur éolien, avec lesquelles, on peut déterminer la puissance du rotor correspond à toute combinaison de la vitesse du vent et celle du rotor.

Pour différentes valeurs de l'angle de calage (β), la valeur maximale de ce coefficient qui correspond à la limite dénommée la limite de **Betz** (théorie de Betz année 1920) du coefficient de puissance qui est de 0.593. Les trois valeurs prises comme entrées sont ; la vitesse du générateur, l'angle β et la vitesse du vent V .

La forme de cette courbe est convenable pour les raisons suivantes :

- $\lambda=0$: Le rotor ne peut plus tourner et donc ne peut extraire de la puissance du vent.
- λ élevées ($\lambda=10$, et plus) : Le rotor tourne plus vite tel qu'il peut être vue bloqué par le vent (disque complètement bloqué), voyant par exemple la caractéristique correspond à $\beta=20^\circ$, il n'a plus de vent transporté par le rotor, et donc pas de possibilité d'avoir de l'énergie à partir du vent.

- Entre $\lambda=0$ et $\lambda=10^\circ$, il y'aura une valeur optimale ($\lambda \sim 7$) pour laquelle la puissance maximale peut être extraite. [102]

La courbe caractéristique de puissance comporte trois grandes zones comme indique la figure II.17.

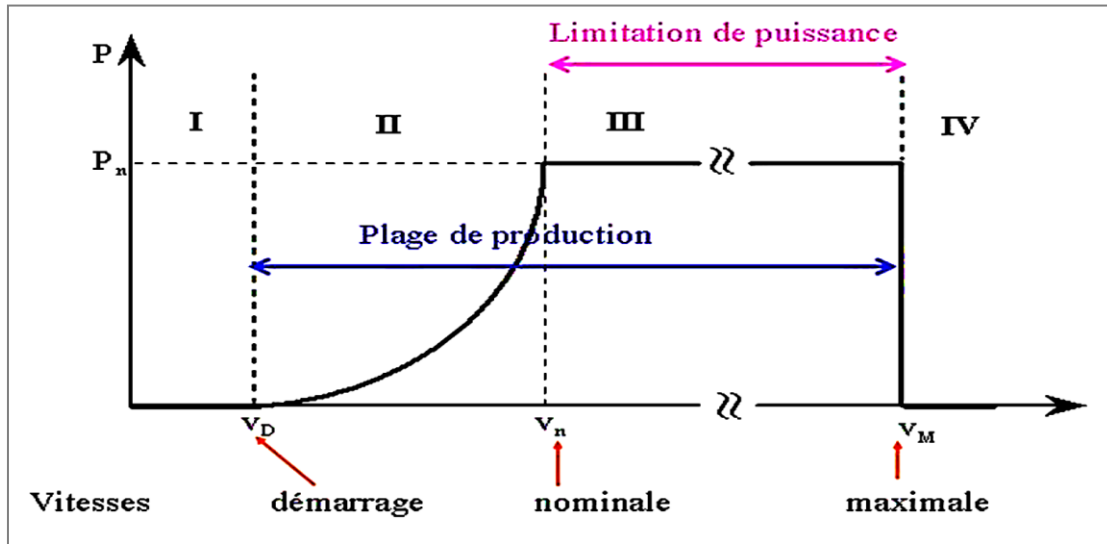


Figure II.17 : Forme typique d'une courbe de puissance d'une éolienne. [98]

- **Zone I :** La vitesse minimale de démarrage : C'est la vitesse laquelle l'éolienne commence à débiter une puissance utile (c'est-à-dire de la puissance électrique).

- **Zone II :** La vitesse maximale ou d'arrêt : représente la vitesse maximale acceptable par l'éolienne. Au-delà de cette vitesse, la tenue mécanique de ces divers composants n'est plus assurée (ou simplement prévue). Si la vitesse du vent sera supérieure, l'éolienne est mise à l'arrêt, idéalement de manière automatique, pour préserver son intégrité.

- **Zone III :** La puissance nominale : C'est la puissance électrique maximale qui peut être extraite de l'éolienne. Elle n'a jamais eu lieu à la vitesse maximale acceptable du vent. [98]

II.9.3. Modélisation du système de stockage :

La demande d'électricité varie en fonction de l'heure du jour et le moment de l'année. Étant donné que le réseau électrique traditionnel n'est pas capable de stocker de l'électricité, l'inadéquation entre l'offre et la demande est plus probablement observée. Comme le concept du **MR** est de plus en plus répandu, un système d'alimentation différé fait le meilleur usage des différents types de production locale. Certaines formes de générations ont un grand temps de réponse et d'autres ont peu de flexibilité dans le fonctionnement.

En outre, certaines formes de générations peuvent démarrer très rapidement pour fournir plus ou moins d'énergie selon le motif de la demande de charge en temps réel.

Le stockage hydroélectrique par pompage emmagasine de l'énergie sous forme d'eau. Le pompage est effectué au moment où l'offre est supérieure à la demande. L'eau est pompée d'un réservoir d'élévation inférieur à un réservoir supérieur en utilisant l'énergie électrique à faible coût. A la période de charge de pointe, l'eau stockée est libérée par les turbines.

Le supercondensateur est le condensateur électrochimique qui a une densité énergétique supérieure à celle des condensateurs communs de l'ordre de milliers de fois. L'optimisation du matériau conduit à des densités d'énergie plus élevées pour une taille donnée du condensateur. Le stockage de l'énergie est utilisé dans de nombreux domaines, mais bien sûr l'un des plus intéressants est celui en parallèle avec une autre source d'énergie pour obtenir des systèmes d'alimentation hybrides comme les batteries.

✚ Les batteries :

Dans notre monde moderne, le rôle des batteries est important en tant que porteurs d'énergie, en raison de sa présence dans les appareils pour un usage quotidien. A la fin du 20e siècle, la demande des batteries augmente rapidement en raison du grand intérêt pour les dispositifs sans fil.

Aujourd'hui, l'industrie de la batterie entre dans la catégorie de l'industrie à grande échelle qui produit plusieurs millions de batteries par mois. L'amélioration de la capacité d'énergie est un enjeu majeur de développement, cependant, pour les produits de consommation, la sécurité est probablement considérée comme tout aussi important aujourd'hui. Avec l'introduction de véhicules électriques hybrides sur le marché il y a le développement technologique dans le domaine de la batterie qui conduit à la réduction des émissions de la consommation de carburant et de gaz. Le développement de la batterie est une tâche majeure pour l'industrie et la recherche universitaire. Le stockage électrochimique est une grande partie du stockage comme indique la figure II.18.

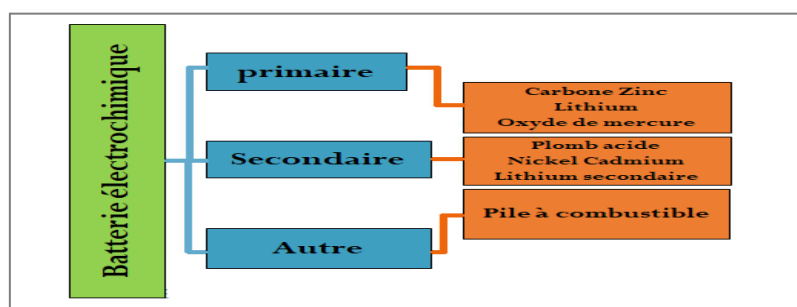


Figure II.18 : Classification des batteries. [98]

Il existe plusieurs approches pour modéliser une batterie. Un modèle de batterie couramment utilisé est le circuit équivalent de thévenin. Comme on le voit sur la figure II.19, il se compose d'une source idéale de tension V_{oc} , une résistance interne R_0 , un condensateur C qui représente la polarisation des plaques métalliques de l'accumulateur et une résistance de surtension R_p qui est due au contact des plaques avec l'électrolyte. Les éléments de ce modèle sont considérés comme constants, mais en réalité leurs valeurs varient en fonction du SOC, de la température ainsi que du taux de décharge.

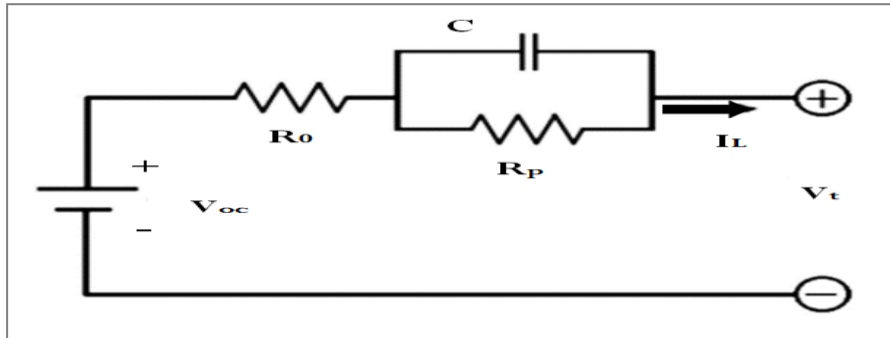


Figure II.19 : Modèle de batterie (Circuit équivalent de Thévenin). [103]

L'équation II.5 représente la tension de la batterie V_t :

$$V_t = V_{oc} - U_{cp} - R_0 \times I_L \tag{II.5}$$

L'inconvénient majeur de ce modèle est que toutes les valeurs sont déraisonnablement supposées être constantes. Il est possible d'étendre le modèle de batterie **Thévenin** à un modèle plus complexe.

La batterie est également modélisée à l'aide d'une source de tension commandée en série avec une résistance constante. Tous les paramètres du circuit équivalent peuvent être estimés pour représenter une batterie spécifique en fonction de sa propre caractéristique électrique. [98]

❖ Paramètres d'identification :

L'état de charge de la batterie est estimé par l'équation II.6 :

$$SOC(t) = \frac{C(t)}{C_{ref}} \tag{II.6}$$

Avec :

$C(t)$: La capacité instantanée de la batterie.

C_{ref} : La capacité de référence de la batterie.

$C(t)$: La capacité instantanée des batteries est calculée par l'équation II.7:

$$C(t) = Q(t_0) + Q_c(t) + Q_d(t) \tag{II.7}$$

Avec :

$Q(t_0)$: Quantité de la charge initiale.

$Q(t_c)$: Quantité de charge échangée pendant la charge.

$Q(t_d)$: Quantité de charge échangée pendant la décharge.

Dans l'objectif de garantir la durée de vie des batteries, son état de charge minimal varie entre 25% et 95% suivant le domaine d'utilisation

L'état du **SOH** des batteries en fonction des modalités de fonctionnement est un sujet encore mal culbuté et reste en recherche un sujet très pénible. Pour intérêt, le vieillissement d'un objet de stockage est très difficile à formuler car il procède de propriétés variées essentielles à la technologie de la batterie.

La profondeur de décharge de chaque cycle, le nombre de cycles et le régime de fonctionnement sont les facteurs les plus agissants sur le vieillissement. Souvent, les producteurs fournissent la cyclable (nombres de cycles) de la batterie en fonction d'une profondeur de décharge pour un ou plusieurs modes de fonctionnement.

Il est bon de mentionner que seulement les décharges détériorent l'état de santé et que la mort des batteries est révélée lorsque sa capacité nominale atteint 80% de sa capacité de référence. Le **SOH** est obtenu par le rapport entre la capacité nominale à l'instant (t) et la capacité nominale initiale par la relation II.8 :

$$SOH(t) = \frac{C_{ref}(t)}{C_{ref}} \times 100 \quad (II.8)$$

Pour calculer la capacité nominale à l'instant (t), une quantité d'énergie perdue à l'instant (t) suite à une décharge est soustraite de la capacité nominale ($t - 1$) comme illustre l'équation II.9

$$C_{ref}(t) = C_{ref}(t - 1) - \Delta C_{ref}(t - 1) \quad (II.9)$$

En tenant compte de la profondeur de décharge qui est la différence entre l'état de charge avant et après sollicitation de la batterie, une variable (A) est introduite corrélée avec la cyclable et la capacité nominale initiale de la batterie qui va retrancher ladite quantité d'énergie perdue à l'instant (t), donc l'équation II.10 est représenté calculer la profondeur de décharge.

$$\Delta C_{ref}(t - 1) = C_{ref}(t_0) \times A \times [SOC(t - 1) - SOC(t)] \quad (II.10)$$

En exploitant la caractéristique de la cyclabilité en fonction du régime de décharge, Les valeurs de (A) sont données par le constructeur. [98]

II.10. Les systèmes hybrides :

II.10.1. Définition :

Un système hybride est un système qui fait intervenir au moins deux sources d'énergie renouvelable comme un panneau photovoltaïque, une éolienne, une pompe hydraulique,... etc. Souvent, ces sources renouvelables sont associées à une source conventionnelle comme un générateur diesel, nécessaire pour délivrer une puissance en continue. En plus des sources d'énergies renouvelables, les systèmes hybrides associent des dispositifs de stockage comme les batteries, les super condensateurs, les piles à combustible, ...etc.

La figure II.20 montre que les différents éléments d'un système hybride.

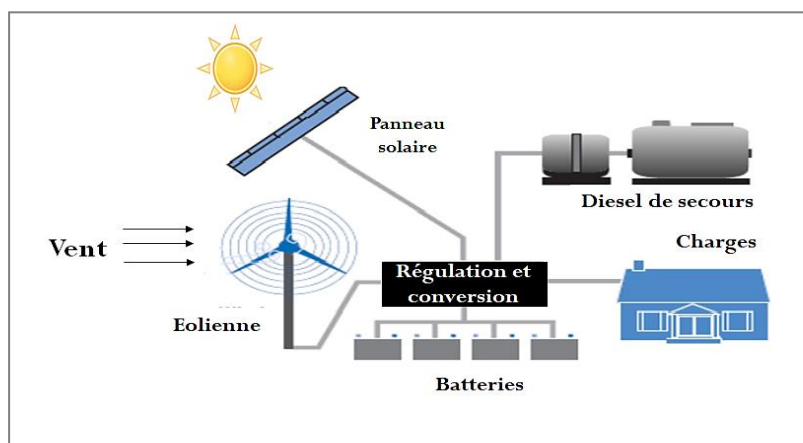


Figure II.20 : Architecture d'un système hybride. [105]

L'objectif principal d'un système hybride est de répondre à la demande de la charge en favorisant l'énergie produite par les sources renouvelables par rapport à celle fournie par les sources auxiliaires comme le groupe diesel.

La performance d'un système hybride en termes de rendement et de durée de vie, est influencée d'une part par la conception, c'est-à-dire par le dimensionnement des différentes composantes qui le constitue, la technologie de ces composantes, l'architecture,...etc. D'autre part, cette performance dépend aussi du choix de la stratégie de gestion considérée. [104]

La combinaison de différentes technologies de production d'électricité avec d'autres sources permet une production d'électricité continue. Il existe plusieurs sources qui peuvent être utilisées dans SHS. Ces systèmes peuvent également inclure d'autres composants tels que des convertisseurs statiques, des charges principales et des charges auxiliaires. Tous ces composants peuvent être connectés à différentes architectures. La figure II.21 représente un schéma général d'un système hybride. [106]

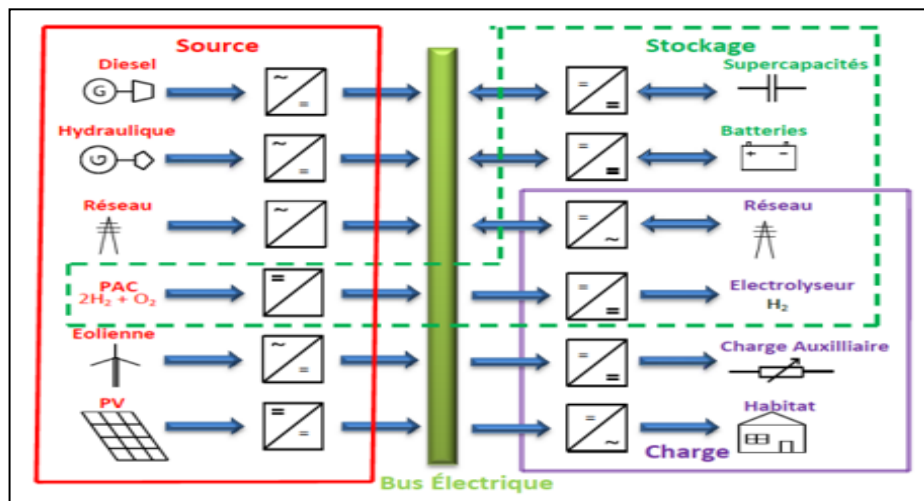


Figure II.21 : Schéma général d'un système hybride. [106]

II.10.2. Classification :

Plusieurs classifications de systèmes hybrides sont réalisées selon le critère choisi : le régime du fonctionnement et la structure du système hybride.

• Le régime du fonctionnement :

Les systèmes hybrides peuvent être divisés en deux groupes. Dans le premier groupe est de travailler en parallèle avec le réseau électrique (connectés réseau). Ces systèmes a pour but de satisfaire la charge du système électrique du pays. Le deuxième groupe représente les systèmes hybrides qui fonctionnent en régime isolé ou en mode autonome. Ils doivent couvrir les besoins des consommateurs situés dans des sites éloignés du réseau électrique : refuges de montagne, îles, villages isolés, etc.

• La structure du système hybride :

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système.

Le premier critère : Avec ou sans source d'énergie classique. Cette source conventionnelle peut être un générateur diesel.

Un second critère : Avec ou sans dispositif de stockage. Le stockage permet d'assurer une meilleure satisfaction des charges électriques pendant les périodes d'absence d'une ressource primaire. Ils peuvent être des batteries rechargeables, des électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, etc.

• **La dernière classification :**

L'architecture du système peut être un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources.

Pour la sélection de la source utilisée un critère important doit être pris en considération qui est le potentiel énergétique disponible qui dépend de l'endroit d'installation du système hybride. Le consommateur électrique alimenté est aussi un facteur important, il détermine le besoin d'une source supplémentaire, d'un dispositif de stockage et/ou d'une source conventionnelle etc.

Une généralisation de la classification présentée est illustrée sur la figure II.22.

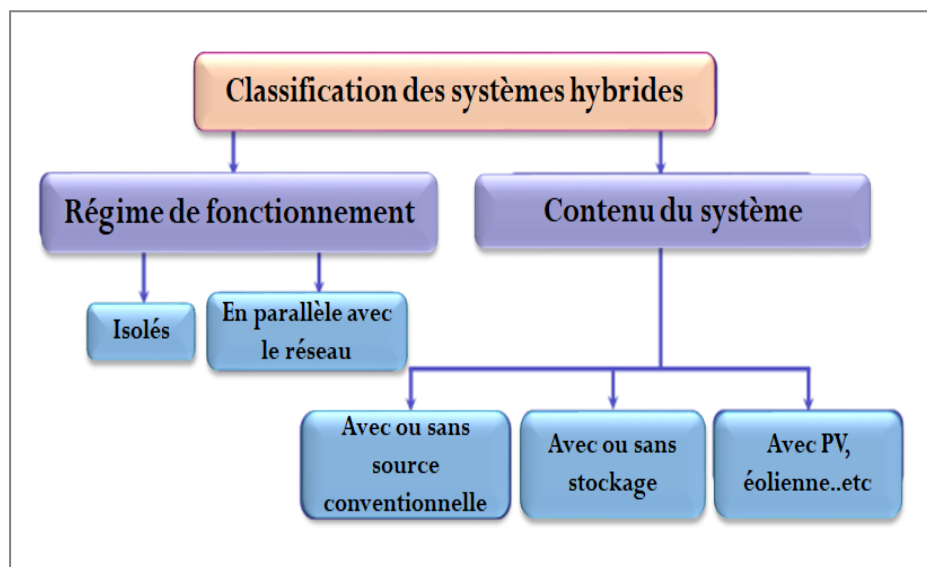


Figure II.22 : Classification des systèmes hybrides. [6]

II.10.3. Le principe de fonctionnement :

Comme nous avons déjà dit précédemment, les systèmes hybrides, travaillent soit en parallèle avec le réseau électrique pour satisfaire la consommation du système électrique d'un pays, ou autonomes afin de garantir la présence de l'électricité d'une île, un village ou chaque sites éloignés du réseau électrique. [6]

II.10.4. Les structures du système hybride :

Les publications, consacrées aux systèmes hybrides photovoltaïques/source conventionnelle présentent des résultats issus de systèmes existants et installés, d'autres

examinent la possibilité d'implantation de panneaux photovoltaïques comme source d'énergie supplémentaire dans des installations existantes avec une source conventionnelle.

Des auteurs ont réalisé des études théoriques sur l'analyse des processus qui prennent place au sein du système sur l'optimisation du dimensionnement du système hybride ou sur celle de la stratégie de gestion de l'énergie. Certains travaux ont fait appel à des logiciels commerciaux comme **HOMER**.

II.10.4.1. Système hybride avec source d'énergie conventionnelle

C'est une structure dotée d'une source d'énergie conventionnelle définie généralement par un générateur diesel et une autre source d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolienne,...etc.). [104]

II.10.4.1.1. Système photovoltaïque/source conventionnelle :

C'est un système doté d'une source photovoltaïque et un générateur diesel défini comme source conventionnelle. Il est utilisé très souvent dans des sites qui se caractérisent par un climat chaud où le potentiel solaire est important.

En mode de fonctionnement autonome, l'objectif de ces systèmes est d'alimenter sans interruption une maison, un bâtiment de logements, ou un village. D'autres systèmes alimentent des centres de recherche où sont également connectés au réseau électrique.

Ces systèmes contiennent généralement des batteries et d'autres dispositifs de stockage. Les batteries et le champ photovoltaïque produisent du courant continu. Par contre, les moteurs diesel peuvent entraîner des générateurs continus ou alternatifs. Les consommateurs demandent souvent du courant alternatif ; on distingue alors différentes structures de systèmes selon le type de la machine électrique couplée avec le moteur diesel. [104]

A. Fonctionnement en série :

Dans ce cas, le générateur diesel est connecté sur le bus courant continu. La connexion peut être directe (dans le cas d'un générateur de courant continu) ou à travers un redresseur. L'installation photovoltaïque et la batterie sont aussi liées à ce bus. Le consommateur est alimenté par un onduleur.

Dans cette configuration, le générateur diesel peut d'une part alimenter la charge à travers les convertisseurs électroniques ou d'autre part charger la batterie. D'après la stratégie de gestion du système hybride, l'énergie produite par l'installation photovoltaïque peut directement alimenter la charge ou passer par la batterie. Des systèmes de ce type ont été étudiés

par différents chercheurs. Le schéma de principe d'un système hybride avec une telle configuration est présenté sur la figure II.23.

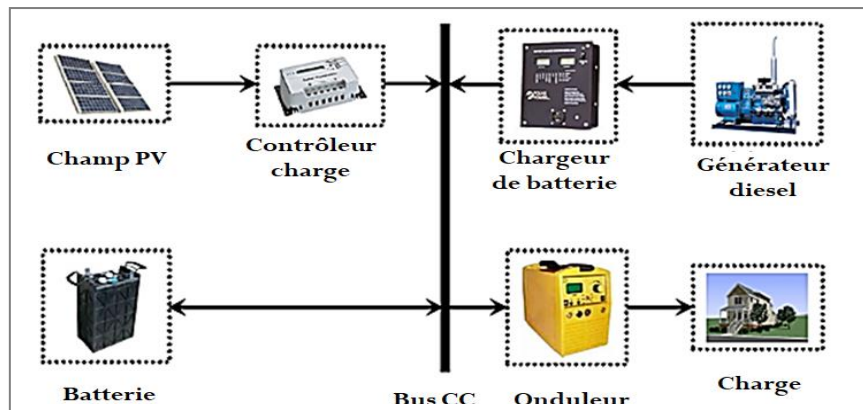


Figure II.23 : Système hybride avec connexion série. [6]

✚ Avantages :

- Un dimensionnement facile du générateur diesel.
- Un schéma électrique simplifié à cause d'une absence de commutation des sources d'énergie en courant alternatif.
- La mise en marche du générateur diesel n'est pas liée avec une interruption de l'alimentation électrique.
- Grâce à l'onduleur, le consommateur peut être alimenté avec une tension, dont la forme du signal, la valeur et la fréquence sont convenables.

✚ Inconvénients :

- L'onduleur ne peut pas travailler en parallèle avec le générateur diesel. C'est pourquoi il doit être dimensionné de manière à ce qu'il puisse couvrir la charge maximale possible.
- La batterie doit avoir une grande capacité.
- Un rendement relativement faible dans le cas d'un générateur diesel à courant alternatif, parce que la puissance fournie est convertie deux fois avant d'arriver au consommateur.
- Une avarie éventuelle de l'onduleur provoque une coupure totale de l'alimentation électrique. [6]

B. Fonctionnement à commutation :

Elle est souvent utilisée malgré quelques inconvénients. Le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur.

L'alimentation par les deux simultanément n'est pas possible. Le générateur diesel peut charger la batterie à partir d'un redresseur. Puisque le système est compliqué, sa gestion doit être automatique. Le schéma du système est illustré sur la figure II.24.

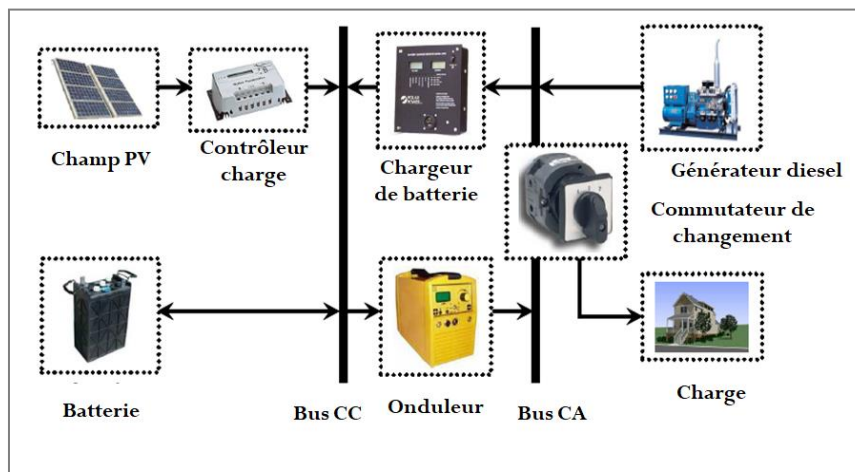


Figure II.24: Système hybride à commutation. [6]

➤ **Avantage :**

- Un rendement élevé, parce que le générateur diesel peut alimenter directement la charge.
- L'onduleur peut assurer au consommateur la tension demandée.
- Même si l'onduleur est endommagé, on n'aura pas l'arrêt complet de l'alimentation électrique, parce que la charge peut être satisfaite par le générateur diesel.

➤ **Inconvénients :**

- Une coupure instantanée de l'alimentation lors de la commutation des sources.
- Le générateur et l'onduleur doivent être dimensionnés pour la consommation maximale du système. De cette façon, ils fonctionnent avec un moindre rendement lors des périodes de faible charge.
- Une construction complexe. [6]

C. Fonctionnement à connexion parallèle :

Le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif. L'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur le bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel.

Quand le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, le convertisseur peut travailler comme redresseur,

Et quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie, il fonctionne comme onduleur.

Le schéma d'un tel système hybride est représenté sur la figure II.25.

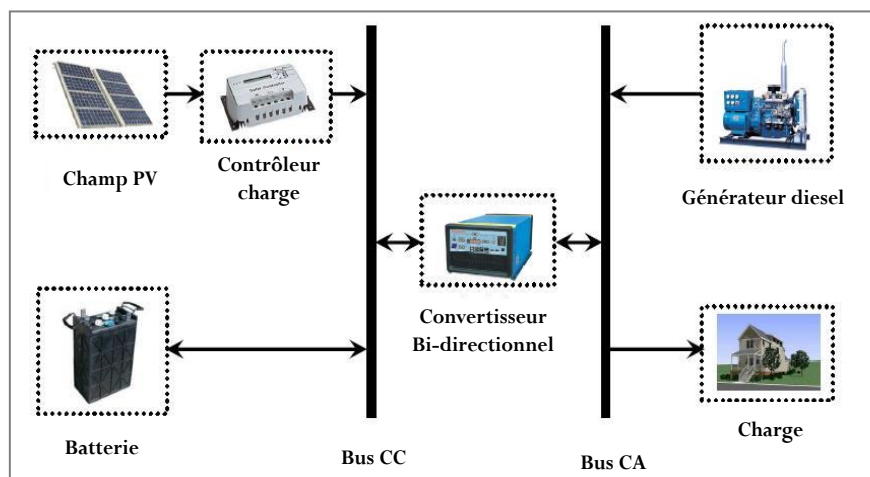


Figure II.25 : Système hybride à connexion parallèle. [6]

✚ Avantages :

- Les composants du système ne doivent pas être dimensionnés pour la charge totale, parce que le consommateur peut être alimenté par les deux sources en même temps.
- Un meilleur rendement, parce que les sources fonctionnent avec une puissance plus proche de leur puissance nominale. De plus il n'y a pas une conversion de l'énergie produite par le générateur diesel.
- Diminution du nombre des convertisseurs électroniques, ce qui diminue le câblage nécessaire et l'investissement initial pour la construction du système hybride.
- Une avarie du convertisseur électronique ne provoque pas de coupure de l'alimentation de la charge.

✚ Inconvénients :

- Le contrôle automatique est obligatoire pour le fonctionnement correct du système.
- Le convertisseur électronique doit fournir une tension sinusoïdale, pour que la synchronisation avec le générateur diesel soit possible.
- Le personnel, qui s'occupe du fonctionnement correct du système, doit être qualifié.
- Les batteries vieillissent rapidement (pas de chargeur) ;
- Le bus continu est plus difficile à contrôler. [6]

II.10.4.1.2. Systèmes éolien/source conventionnelle :

Les recherches sur les systèmes hybrides éolien/diesel se distinguent des études sur les systèmes hybrides photovoltaïques car les éoliennes sont capables de produire du courant alternatif identique à celui produit par le générateur diesel. De cette façon il n'y a pas une grande diversité des configurations du système hybride.

Ces systèmes sont plus répandus sur les îles, où les brises de mer et le vent favorisent l'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité. Des études ont été réalisées sur des systèmes installés sur des îles de diverses tailles – petites comme les îles Canari, en passant par des îles moyennes comme la Corse, jusqu'à la grande île comme l'Angleterre.

Les charges, alimentées par le système hybride, sont de différents types : des habitations isolées, des bâtiments de logements, des bâtiments publics, des villages ou même des îles. Dans ces cas, le système hybride fonctionne en régime autonome.

Lorsque le système hybride fonctionne en régime autonome, il comprend souvent un stockage qui peut être idéal, classique par batteries, ou innovant par utilisation d'un électrolyseur et d'une pile à combustible avec stockage d'hydrogène.

Des techniques économiques ont été développées pour l'analyse des systèmes hybrides basées sur des observations réelles, ou sur des prédictions d'évolution des coûts. [6]

II.10.4.1.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel :

Une partie des travaux est orientée vers des systèmes installés ou vers la conception de nouveaux systèmes. On trouve aussi des études d'interconnexion de systèmes dans le réseau électrique, dans l'état de New York ou en Arabie Saoudite.

D'autres auteurs optimisent la configuration du système selon divers critères : probabilité de perte de charge, combinaison d'un coût minimal du système et d'une quantité minimale d'émissions nuisibles auxquels s'ajoute la charge non satisfaite minimale.

Ces systèmes alimentent des maisons et des refuges ou des villages. Ils peuvent être autonomes ou interconnectés avec le système électrique du pays.

Le stockage peut être sous forme de batteries, de réservoir d'hydrogène avec électrolyseur et pile à combustible ou d'une combinaison des deux. [6]

II.10.4.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle :

Ces systèmes hybrides fonctionnent surtout en mode autonome dans des sites où le raccordement au réseau électrique est difficile, voire même impossible. Quatre configurations de système hybride avec ou sans stockage sont disponibles pour ces systèmes.

II.10.4.2.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage :

Une autre source d'énergie doit être installée en combinaison avec l'installation photovoltaïque, pour qu'il soit possible de satisfaire la charge durant la nuit ou par temps nuageux. Ces systèmes alimentent soit des maisons, soit des villages.

Le stockage est parfois idéal, un banc de batteries, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de deux dispositifs de stockage différents comme électrolyseur et batterie ou électrolyseur et supercondensateur.

L'utilisation de supercondensateurs est de conception très récente et sont utilisés pour un stockage très court avec une réactivité de quelques dixièmes de secondes, tandis que l'électrolyseur et le réservoir d'hydrogène permettent un stockage plus important en terme de quantité stockée mais plus lent. [6]

II.10.4.2.2. Système hybride éolien/stockage :

L'interconnexion du dispositif de stockage avec un générateur éolien peut avoir deux objectifs possibles : soit un rôle de tampon lorsque le système fonctionne en parallèle avec le réseau électrique, le dispositif permet alors de lisser les variations rapides de la puissance électrique en provenance de l'éolienne, soit un rôle de stockage à plus long terme, en régime autonome pour permettre l'alimentation du consommateur lors de périodes de faible vitesse du vent. Le réseau électrique peut être de grande taille, ou de faible taille (réseau insulaire).

Comme pour les autres systèmes précédemment présentés, ils peuvent alimenter soit un ménage, soit un bâtiment (hôtel) et même un village.

Les modes de stockage étudiés peuvent être une batterie, un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène, une combinaison des deux, des supraconducteurs ou une combinaison d'un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène et un super condensateur. [6]

II.10.4.2.3. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage :

L'inconvénient majeur des deux systèmes hybrides précédemment décrits est le manque de diversité de l'alimentation parce que la ressource primaire utilisée est unique. Cela induit plusieurs désavantages comme par exemple le surdimensionnement des éléments dont l'objectif est d'assurer une alimentation continue, ce qui va se traduire par un investissement initial élevé (et donc limiter le développement de ces systèmes) et une augmentation du prix de kilowattheure produit. Ces inconvénients peuvent être limités ou même éliminés par l'incorporation d'une seconde source d'énergie.

Comme pour les autres systèmes hybrides, ils peuvent assurer l'alimentation des ménages ou des villages. Ils sont installés sur tous les continents.

Les dispositifs de stockage sont plus souvent des batteries, parfois un électrolyseur avec réservoir d'hydrogène ou une combinaison de batterie et stockage d'hydrogène. [6]

II.10.4.2.4. Systèmes hybrides photovoltaïque/éolien sans stockage :

Rarement utilisés, parce qu'il n'assure pas une sécurité d'alimentation, il est besoin soit d'une source conventionnelle, soit un dispositif de stockage. Donc, les études sur ces systèmes sont rares. [6]

II.10.5. Dimensionnement d'un système hybride :

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée par deux critères essentiels qui sont le gisement solaire, le gisement éolien et la demande de l'énergie. Cette gestion d'énergie s'appuie sur l'intelligence des dispositifs de régulation et de contrôle utilisés

Le dimensionnement d'une installation hybride éolien -photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire de module pour couvrir les besoins de la charge à tout instant ainsi la capacité de charge de la batterie.

L'objectif est de maintenir un niveau de fiabilité élevé avec un coût minimal grâce à un dimensionnement optimal de systèmes hybrides (éolien – photovoltaïque). [107]

II.10.5.1. Méthodes de dimensionnement :

Les techniques d'optimisation de dimensionnement des systèmes hybrides peuvent être classées en techniques classiques, techniques modernes et outils logiciels.

Les techniques classiques utilisent des méthodes de construction itératives, numériques, analytiques, probabilistes et graphiques.

Les techniques modernes emploient des méthodes artificielles et hybrides. Ces méthodes peuvent déterminer le dimensionnement optimal du système et obtenir une meilleure convergence et une plus grande précision dans la recherche d'un ensemble de solutions optimales.

La troisième approche d'optimisation du dimensionnement est les logiciels de dimensionnement. Le software le plus utilisé pour l'optimisation du dimensionnement du système hybride autonome est le logiciel **HOMER**. Les méthodes d'optimisation couramment utilisées sont brièvement décrites ci-dessous. [108]

II.10.5.1.1. Les méthodes classiques :

Récemment, un nombre limité d'études ont été réalisées en utilisant des méthodes classiques dans l'optimisation du dimensionnement du système hybride autonome. Ces techniques d'optimisation classiques sont :

- **Méthode itérative :**

L'évaluation des performances du système hybride dans une approche itérative est réalisée à l'aide d'un programme récursif ou par des calculs manuels qui se termine lorsque le dimensionnement optimal est trouvé. Généralement, l'ensemble du modèle d'optimisation prend en compte la fiabilité de l'alimentation et le coût du système.

La plupart des chercheurs ont pris en compte des paramètres tels que la capacité des panneaux photovoltaïques, la puissance d'éolien et la capacité de la batterie. Concernant le niveau de fiabilité souhaité, la configuration optimale est celle qui a le coût le plus bas parmi tous les ensembles de configurations possibles.

Dans cette méthode, le coût du système est minimisé en faisant varier linéairement les valeurs des paramètres ou par des techniques de programmation linéaire. La méthode peut être répétée plusieurs fois avec des conditions initiales choisies au hasard et le meilleur minimum local calculé par la méthode est considéré comme la solution optimale.

Cependant, cela augmente considérablement le temps de calcul et ne garantit pas une configuration optimale. [108]

- **Méthode de construction graphique :**

Dans cette méthode, seules deux variables de décision ont été prises en compte dans l'optimisation, soit la capacité à installer en photovoltaïque et la batterie, ou le photovoltaïque et l'éolienne.

La figure II.26 présente l'illustration graphique proposée, la solution optimale (la pente qui présente le coût minimal du système) peut être obtenue en utilisant cette méthode, avec « b » est le coût de batterie et « a » présente le coût de PV. Certains facteurs importants tels que le nombre de modules photovoltaïques, la superficie photovoltaïque, l'angle de pente photovoltaïque, la surface balayée par les pales de la turbine et l'altitude de l'éolienne ont été totalement optimisés en utilisant cette méthode. [108]

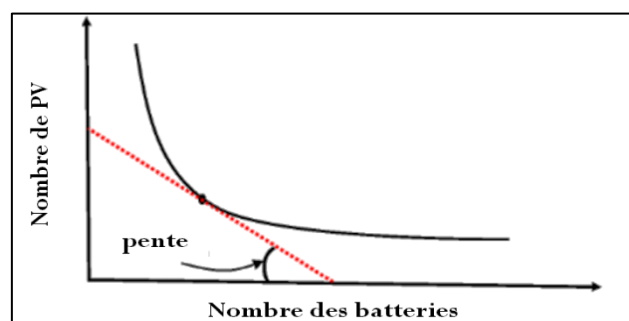


Figure II.26 : Illustration de la méthode de construction graphique. [108]

Les approches probabilistes examinent l'effet du rayonnement solaire et la variation de la vitesse du vent sur le dimensionnement d'un système hybride.

II.10.5.1.2. Les méthodes artificielles :

Récemment, des techniques artificielles ont été adaptées par plusieurs chercheurs pour atteindre le dimensionnement optimal du système hybride autonome. De nombreuses approches sont rapportées dans la littérature telle que les algorithmes génétiques, la (PSO), et (ABC).

Ces méthodes méta-heuristiques sont basées sur la copie de processus naturels tels que le déplacement d'essaim de particules, similaire à la (PSO). Ces algorithmes peuvent gérer la variation non linéaire des composants du système hybride et fournir un ensemble de solutions optimales. [108]

Par conséquent, ils sont plus flexibles dans le traitement de problèmes d'optimisation complexes et fournissent des résultats plus précis par rapport aux méthodes classiques. La figure II.27 est expliquée la structure générale et les principales étapes pour obtenir le dimensionnement optimal du système hybride avec les méthodes artificielles. [108]

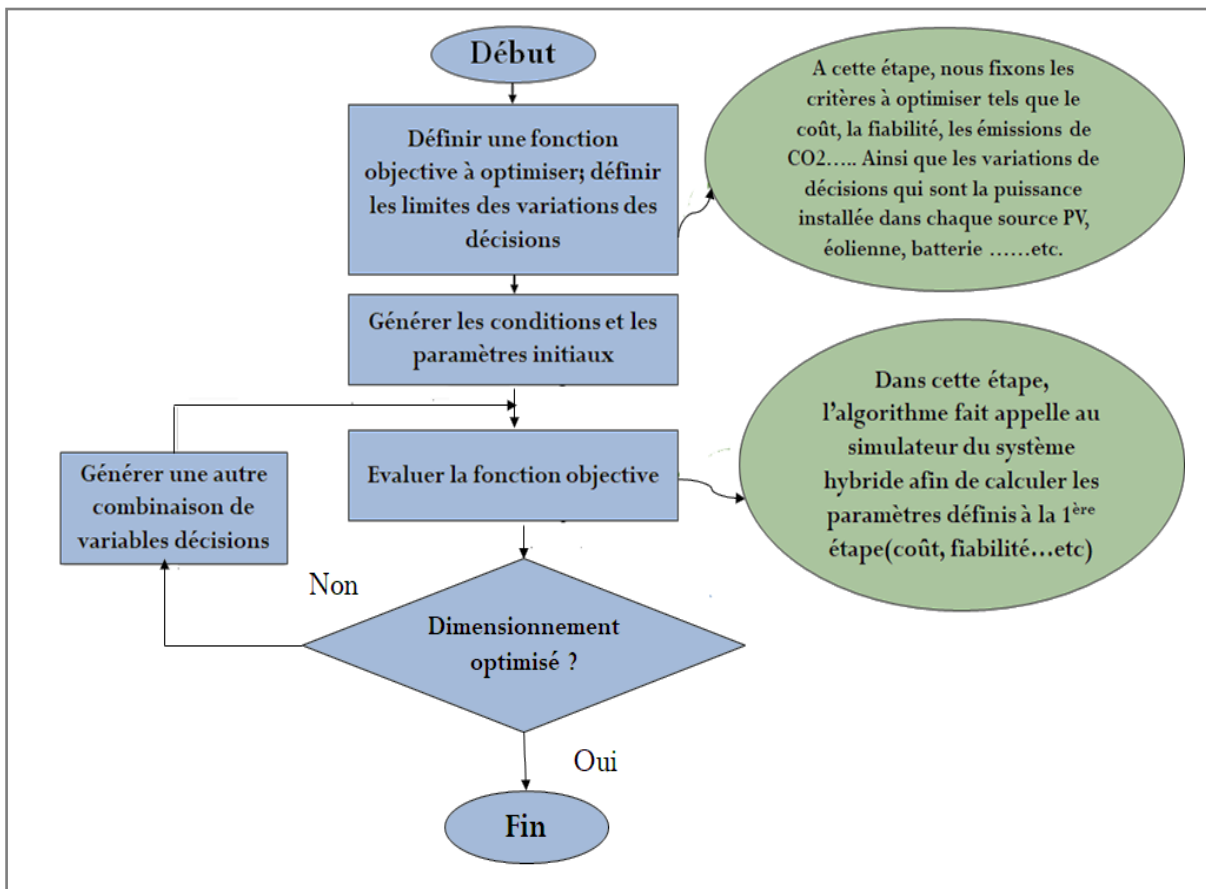


Figure II.27 : Processus général d'exécution suivi dans le dimensionnement optimal des systèmes hybrides basés sur des méthodes artificielles. [108]

II.10.5.1.3. Les logiciels de dimensionnement :

Les logiciels de simulation sont les outils les plus courants pour évaluer les performances du système d'énergie hybride. En utilisant la simulation, le dimensionnement optimal des composants d'un système hybride peut être déterminé en comparant les performances techniques et le (COE) pour différentes configurations du système. [108]

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement parmi lesquels les plus connus sont :

- **Hybrid2** : ce logiciel est destiné à l'étude de différents systèmes hybrides avec divers éléments. Il dispose d'outils pour effectuer une analyse économique. La présentation des résultats peut être réalisée de deux manières – des résultats synthétisés ou des résultats détaillés avec variation dans le temps.

- **HOMER** (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) : avec ce logiciel, il est possible de modéliser des systèmes hybrides qui travaillent en parallèle avec le réseau électrique ou en régime autonome. Il dispose de modèles de générateurs conventionnels et à sources d'énergie renouvelables. De plus, le logiciel contient des algorithmes d'optimisation à l'aide desquels il est possible de choisir le meilleur système hybride.

- **RAPSIM** (Remote Area Power Supply Simulator) : c'est un logiciel de simulation pour différents modes d'un approvisionnement en courant alternatif. Il peut être utilisé pour le dimensionnement d'installations photovoltaïques, de générateurs éoliens et diesel dans des systèmes hybrides isolés.

De plus, il faut signaler que l'utilisation de ces logiciels a des inconvénients puisqu'ils limitent les modifications de l'utilisateur et empêchent une analyse approfondie des systèmes hybrides à cause du code protégé. [6]

II.10.6. Modélisation d'un système hybride photovoltaïque/éolien :

C'est un système hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable, à savoir un générateur photovoltaïque pour convertir l'énergie du soleil et un générateur éolien pour convertir celle du vent. En cas d'absence de soleil et de vent, des batteries de stockage et un générateur diesel sont prévus pour l'alimentation de secours. [104]

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques au site, et les données relatives aux équipements. [109]

Les étapes de la modélisation sont :

II.10.6.1. Modélisation de la chaîne photovoltaïque :

La chaîne de conversion photovoltaïque, constituée d'un générateur **PV** et l'ensemble : hacheur survolteur et son système de commande, permettant d'extraire la puissance maximale.

- Modélisation du rayonnement solaire.
- Modélisation d'une cellule photovoltaïque.
- Modélisation du convertisseur à pilotage MPPT. [109]

II.10.6.2. Modélisation de la chaîne éolienne :

- Modèle du vent.
- Modèle de la turbine.
- Modèle de l'arbre de la machine.
- Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents.
- Modélisation du redresseur.
- Puissance éolienne produite. [109]

II.11. Avantages et obstacles des Micro-réseaux :

Avantages :

Technique :

Assurer la fiabilité :

- Résilience du système : la continuité du service 24/7 avec la génération d'énergie locale.
- Qualité de puissance : vous assure d'avoir une bonne qualité d'énergie tout en maintenant la qualité, la stabilité et la sécurité électrique.

- Disponibilité de puissance : vous assure que vous avez assez de puissance pour répondre à la demande en équilibrant l'offre du réseau central, la production locale, et la gestion de la charge.

Efficacité optimale :

- Réduire les pertes : la proximité entre la production et la consommation permet d'optimiser l'acheminement de l'énergie.

- Réutiliser la chaleur : l'utilisation à la fois de l'électricité et de la chaleur, ce qui augmente le rendement énergétique global avec le système de production d'électricité et de chaleur (**CHP**) combinée, qui capte l'énergie thermique résultante de la production d'électricité

pour une grande variété de besoins thermiques (vapeur d'eau chaude, chauffage et refroidissement), ce qui offre des opportunités pour optimiser le DG.

• Optimisation des ressources : les **MR** sont intelligents et peuvent optimiser sur quand et comment utiliser le réseau central et les sources d'énergie distribuée locales pour permettre d'atténuer les coûts de l'électricité à ses utilisateurs et réduire la dépendance du réseau principal. [90]

❖ **Economique :**

✓ En fonction de sa taille, le **MR** peut être utilisé avec un rôle d'agrégateur, pour s'ajuster sur les marchés. Les **MRs** permettent également de différer des investissements de réseaux, la proximité entre production et consommation permettant d'optimiser l'acheminement de l'énergie. Ils permettent aussi de réduire le volume des pertes techniques.

❖ **Sociétal :**

✓ Un **MR** apporte des réponses à l'évolution des besoins énergétiques fondamentaux d'un territoire. Il fournit également un réseau plus sûr et fiable en cas d'incident. Parce qu'il s'agit d'un projet local, il facilite la formation de nouvelles initiatives et de partenariats entre les acteurs locaux.

❖ **Environnemental :**

✓ Ils permettent de mieux intégrer les énergies de sources renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation de centrales thermiques en zones fragiles. [83]

✓ Ils permettent de mieux intégrer les énergies de sources renouvelables sur les réseaux et ainsi d'éviter l'installation de centrales thermiques.

✓ Stocker et exploiter l'énergie à utiliser en cas de besoin.

✓ Réduire les émissions de gaz à effet de serre et l'empreinte carbone. [90]

✚ **Obstacles :**

➤ La tension, la fréquence et la qualité de l'alimentation sont les trois principaux paramètres qui doivent être considérés et contrôlés selon des normes acceptables.

➤ L'énergie électrique a besoin d'être stockée (ex batteries) nécessitant ainsi plus d'espace et de maintenance.

➤ La resynchronisation avec le réseau électrique est difficile.

➤ La protection du **MR** est l'un des défis les plus importants face à la mise en œuvre du micro réseau.

➤ Les normes d'interconnexion doivent être développées pour assurer la cohérence. [90]

II.12. Exploitation et maintenance des micro-réseaux :

Dans le mode connecté au réseau, tous les alimentateurs sont alimentés par le réseau utilitaire ou principal, et le **MR** typiquement fonctionne de cette façon tant qu'il n'y a pas de perturbation de la qualité de l'alimentation sur le réseau principal. Cependant, lorsqu'il y a un défaut d'une autre perturbation de l'alimentation sur le réseau principal, le **MR** en sera déconnecté (de manière planifiée ou non). On parle de mode de fonctionnement "isolé".

De telles transitions, ainsi que le maintien de la stabilité du système et la détection des défauts sont trois domaines critiques pour un bon fonctionnement du **MR**. [86]

II.12.1. Transition entre les modes connectés au réseau et insulaire :

La possibilité de transférer entre les modes connectés au réseau et isolé sans aucune interruption pour les clients est une fonction importante. Si certaines conditions du système de charge et de distribution sont prévues et doivent être gérées à l'avance, de tels transferts sans soudure peuvent idéalement être initiés par l'opérateur du **MR**. Si un avertissement de tempête a été émis, l'opérateur de **MR** peut décider de transférer le **MR** du mode connecté au réseau au mode isolé en initiant simplement la séquence via leur système de contrôle.

Une fois la tempête passée, le **MR** peut reprendre le fonctionnement connecté au réseau en se synchronisant de manière transparente dans le système de distribution.

Dans le cas des événements imprévus tels que les défauts du système de distribution cependant, il peut y avoir de brèves interruptions d'approvisionnement aux charges du **MR** en fonction du type de système de protection et de la configuration.

Dans le sens inverse, tandis que les reconnexion, le **MR** a besoin de certaines informations du réseau pour la synchronisation, en particulier la tension et les consignes de fréquence.

Avec les bons contrôles, la synchronisation peut être réalisée relativement rapidement, typiquement dans quelques secondes, réalisant ainsi des opérations d'îlots (au moins dans le cas de transitions planifiées) et de reconnexion transparente, et éliminant ainsi les brèves pannes qui pourraient autrement affecter les charges critiques de l'utilisateur final. [86]

II.12.2. Maintien de la stabilité du système de MR et fonctionnement synchrone :

Le réseau électrique principal dicte la dynamique globale du système en mode connecté au réseau, en raison de la taille beaucoup plus petite des **MR**. Ainsi, l'analyse de stabilité d'un

MR en mode connecté au réseau est similaire à celle du réseau électrique plus grand auquel il est connecté.

Inversement, dans un fonctionnement de **MR** en îlot, la dynamique du système est représentée par les **DGs**, dont la sortie fluctuante, couplée à une charge variable, peut poser des défis au bon fonctionnement du **MR**. Trois niveaux de contrôle de surveillance sont généralement utilisés pour le fonctionnement fiable d'un **MR** en mode connecté au réseau : le niveau de distribution, le niveau de **MR** et le niveau local.

L'opérateur de marché et l'opérateur de réseau de distribution (**DNO**) sont impliqués au niveau de la distribution. **MCC** gère le contrôle du niveau du **MR**, et le contrôle du niveau de l'unité est effectué par des contrôleurs locaux. Au niveau de la distribution, les signaux sont envoyés par le **DNO** et l'opérateur de marché. **MCC** gère les communications entre **DNO** et contrôleur local pour intégrer le **MR** avec le réseau principal.

Lorsqu'un **MR** fonctionne en mode connecté au réseau, l'utilitaire fournit une référence pratique et fiable pour la tension et la fréquence afin de maintenir le fonctionnement synchrone du **MR**.

Cependant, lorsqu'il est isolé du réseau, il doit compter sur ses propres actifs internes pour fournir cette référence afin de prendre en charge indépendamment la qualité de l'alimentation et de prendre en charge tout changement des niveaux de tension du système.

De tels systèmes doivent s'appuyer sur un onduleur intelligent couplé à stockage de la batterie, qui fonctionnera en mode de contrôle de la tension et de la fréquence pour fournir ses propres points de référence, ainsi qu'en conjonction avec d'autres dispositifs tels que les compensateurs statiques (**STATCOM**) pour fournir une régulation de tension continue à action rapide. La gestion de ce processus est l'une des principales fonctionnalités de contrôle d'un **MR** entièrement renouvelable. [86]

II.12.3. Défauts :

Un défaut électrique en termes simples est un courant anormal sur le réseau, quelque chose qui peut résulter de diverses raisons, y compris des courts-circuits. Les méthodes traditionnelles de détection de défaut des réseaux de services publics ne s'appliquent pas aux **MR** en raison de la bidirectionnalité du flux de puissance, de la nécessité de faire la distinction entre les modes de fonctionnement connectés au réseau et les modes de fonctionnement isolés, et du fait que les convertisseurs interfaçant les **DERs** fournissent un courant de défaut limité par rapport à certains équipements et machines qui pourraient se trouver sur le **MR**.

La détection des défauts et la conception des systèmes de protection sont des domaines extrêmement critiques pour les **MR**, et il n'existe actuellement aucune solution standard unique. La conception et le processus sont généralement personnalisés pour le **MR** individuel avec plusieurs méthodes ou combinaisons utilisées, y compris la protection différentielle, les systèmes de communication et les algorithmes avancés de traitement du signal. [86]

II.12.4. Dépenses opérationnelles :

Les coûts opérationnels dans un **MR** peuvent varier considérablement, mais ont généralement des composants fixes et variables. Considérer strictement les coûts opérationnels, c'est-à-dire hors coûts de maintenance, les coûts fixes proviennent généralement principalement du personnel et les frais généraux et administratifs ; et les coûts variables de la production d'énergie. Cette dernière étant essentiellement le coût total de l'électricité fournie par le **MR** à ses utilisateurs finaux.

Le coût total effectif de l'énergie dans le **MR** est, par conséquent, le coût de production par chaque source dans le **MR** (basé sur **LCOE** du constituant générant des **DER**), plus l'énergie achetée du service public, moins tout paiement reçu du service public pour l'électricité exportée et les services de réseau qui lui sont fournis (par le contrôle des sources de production distribuables et **DSM** des charges flexibles contrôlables).

Cela implique que les coûts opérationnels du **MR** dépendent grandement sur la conception optimale du mix de génération du **MR**, et en tirant parti de la répartition économique de chacun de ces fonctions pendant le fonctionnement. [86]

II.12.5. Maintenance :

Comme dans le cas de tout autre produit, système ou infrastructure, une maintenance et un entretien réguliers sont essentiels pour assurer des performances fiables sur la durée de vie efficace d'un **MR**. Coûts fixes (personnel d'entretien salaires) et les coûts variables (les coûts variables directs qui comprennent les coûts des composants de remplacement et les coûts indirects les coûts variables qui incluent la génération de secours de remplacement pendant les périodes d'arrêt de maintenance) seront engagés pour cela.

La stratégie et les procédures de maintenance d'un **MR** sont généralement effectuées par le personnel d'exploitation et d'entretien, basé sur des protocoles et des intervalles établis tels que la maintenance générale périodique, la prévention planifiée maintenance et maintenance prédictive basée sur l'analyse des données.

Étant donné qu'il existe plusieurs **MR** différents applications, avec des exigences de service variables et des scénarios de connectivité au réseau, il n'y a pas de solution unique prescription, et les coûts de maintenance doivent être comparés au coût de rupture de panne, potentiel de risque réduction et amélioration de la fiabilité pour produire une mesure financière quantifiée, telle que le pourcentage ou le risque absolu réduction par dollar ou dépense et / ou investissement.

Les activités de maintenance et les coûts dans un **MR** sont essentiellement ceux de ses composants individuels tels que les sources de production distribuée renouvelables ou non renouvelables, les batteries, le système de contrôle du **MR**, les capteurs, les réseaux de communication, le système de distribution, l'équipement de protection, les transformateurs et les composants électriques.

Par exemple, les procédures de maintenance des systèmes solaires photovoltaïques sont disponibles en détail auprès de sources pertinentes, son coût de maintenance annuel étant généralement d'environ 2% de son coût en capital. Comme dans la plupart des usines opérationnelles, les activités d'exploitation et d'entretien peuvent être réalisées par vous-même, confiées à un entrepreneur en exploitation et entretien, ou gérées par l'intégrateur qui a construit l'usine-chacune a ses avantages et ses inconvénients.

Cet aspect revient souvent au stade du financement dans le cadre de la diligence raisonnable sur les capacités globales et la crédibilité du développeur et de l'opérateur du **MR**.

[86]

Les options de maintenance est assurée par le tableau II.6.

Tableau II.6 : Options de maintenance. [86]

Personnel	O&M	Intégrateur
Vous gérez les opérations quotidiennes et résolvez les problèmes s'ils surviennent.	Certaines entreprises se spécialisent dans les systèmes de surveillance.	Les personnes qui ont conçu et construit votre micro-réseau l'exécuteront également.
<ul style="list-style-type: none"> • Souvent moins cher, et vous êtes sur place si quelque chose devait aller Faux. • La complexité nécessite généralement une formation et un personnel dédié au MR. 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût-compétitif et libère votre temps. • Toujours une courbe d'apprentissage pour comprendre vos MR, 	<ul style="list-style-type: none"> • Ils ont construit votre micro-réseau, afin qu'ils le sachent mieux, et leur formation le personnel sera le plus rapide pour résoudre tous les problèmes.

II.13. Conclusion :

Le deuxième chapitre consiste à mener une étude des topologies applicables aux micro-réseaux afin d'élaborer un plan de réalisation du prototype d'étude comprenant les modules, photovoltaïque, éolien et diesel. L'implémentation des modules de stockage et de charges locales sera aussi étudiée.

Ensuite, nous avons étudiés la modélisation du chacun des composants essentiels de la structure de micro réseau, principalement les générateurs et les modules de stockage.

Des algorithmes de poursuite de point de puissance maximale (MPPT) et leurs performances énergétiques ont été présentés afin d'améliorer les performances de suivi en terme de stabilité et de précision.

Nous avons aussi présentés une description des systèmes hybrides, notamment leurs classifications, configurations, dimensionnement et modélisation.

Et nous avons terminés ce chapitre, par les avantages et les obstacles des MR, leurs maintenances qui sont des critères essentiels qui doivent être pris en compte dans l'étude des MR.



Chapitre III

**Simulation numérique et discussion
des résultats**

III.1. Introduction :

La planification optimale des ressources à inclure dans un système hybride et la détermination d'une stratégie de travail parfaite sont donc très importantes. **HOMER** est l'un des logiciels les mieux utilisés pour cette planification optimale en raison de sa large gamme de capacité d'analyse et de capacité de prédiction avancée basée sur la sensibilité des variables. De plus, **HOMER** fournit des options pour choisir un système hybride parfait à partir d'un grand ensemble de résultats disposés dans l'ordre d'optimisation du coût de l'énergie. [110]

L'étude d'une installation en utilisant **HOMER** et qui nous avons utilisés dans ce chapitre est organisée de la façon suivante : après avoir localisé le site choisi sur le logiciel, déterminer son profil de charge.

Intégrer les données météorologiques qui dépendent de l'emplacement choisi qui sont des données nécessaires pour les calculs du logiciel.

Le dimensionnement du générateur photovoltaïque, du générateur éolien, du générateur diesel, et des batteries de stockages est aussi important pour obtenir les meilleurs résultats et solutions. Par la suite, un ensemble de critères de sélection pour les différentes options présentées doit être établi.

A la fin, la simulation et l'interprétation des résultats pour une configuration fiable et optimale du système.

Notre objectif dans ce troisième chapitre est d'analyser l'efficacité énergétique de ce système de fabrication dans son ensemble, ainsi que la quantité d'énergie utile disponible aux bornes de la charge. Pour cela, nous avons choisis d'optimiser en fonction de critères technico-économique. [111]

III.2. Site d'implantation :

Ain sefra fait partie de la Daïra et la commune du même nom, relevant de la Wilaya de Naama depuis le dernier découpage de **1984**. La commune se situe à **65 km** au Sud-Ouest du Chef-Lieu de la Wilaya à **440 km** d'Oran et à **900 km** d'Alger et s'étend sur **1070 km²**. Limitée au Nord par la commune de Naâma, à l'Est par celle de Tiout, à l'ouest par la commune de Sfisifa et au sud par Moughrar dont la pente est de **25%**. La figure III.1 représente la localisation de notre site. [112]



Figure III.1 : Monographie de la wilaya de Nâama 2013. [113]

Le tableau III.1 représente les données générales de la commune d'Ain Sefra.

Tableau III.1 : Données générales de la commune d'Ain Sefra. [114]

Superficie (km ²)	Population (en 2019)	Densité de la population (Habi/Km ²)
1 004,94	77 721	77,34

Et le tableau III.2 représente les données géographiques d'après le logiciel utilisé (**HOMER**).

Tableau III.2 : Données géographie du lieu d'implantation (Ain Sefra).

Caractéristiques / Site	Longitude (°)	Latitude (°)	Altitude (m)	Situation
Ain Sefra	0.38	32.37	1058	Sud-ouest

III.3. Données météorologiques de la région d'Ain Sefra :

Les données que nous avons utilisées dans notre étude (irradiation solaire, température ambiante, vitesse du vent) sont de l'année **2020**.

III.3.1. Donnée solaire du site :

Le potentiel climatique de la région d'**Ain Sefra** permet de définir deux grandes saisons, une saison froide et relativement humide comprise entre le mois de novembre et le mois d'avril et une saison plutôt chaude et sèche qui débute du mois de mai jusqu' au mois d'octobre. [108]

Ces données servent d'entrée au logiciel car elles définissent la capacité opérationnelle des panneaux photovoltaïques annuellement. [115]

III.3.2. Température ambiante :

L'effet de la température ambiante sur les performances de sortie des panneaux solaires sont pris en compte. [115]

La région connaît un écart considérable entre les températures d'hivers et d'été. Les froids sont rigoureux et vifs, la température descend au-dessous de zéro la nuit. Par contre en été la chaleur répercutée par le sol est excessive. [112]

III.3.3. La vitesse du vent :

Le vent, au niveau de cette région sensible et fragile, car il favorise et active le processus de l'érosion des sols et de désertification, contribuent au processus d'ensablement réduisent le taux d'humidité de l'air et par conséquent augmentent l'évapotranspiration des plantes. [112] Les données météorologiques d'Ain Sefra sont sur le tableau III.

Tableau III.3 : Données météorologiques de la région d'Ain Sefra. [116], [117]

Caractéristiques météorologiques	Mois					
	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin
Température ambiante (°C)	7,540	12,680	15,520	22,960	32,800	26,130
Irradiation solaire (KWh/m ² /j)	3,931	4,962	6,341	7,731	8,620	8,949
Vitesse du vent (m/s)	1,830	2,270	3,500	2,220	3,240	3,140
Caractéristiques météorologiques	Mois					
	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Température ambiante (°C)	32,400	34,860	27,920	22,340	19,180	7,260
Irradiation solaire (KWh/m ² /j)	8,843	8,342	7,383	6,119	4,751	3,882
Vitesse du vent (m/s)	3,440	2,830	2,160	2,050	4,330	4,940

La figure III.2 représente le rayonnement solaire à **Ain Sefra**, son minimum est de 3,882 KWh/m²/jour en décembre et son maximum de 8,949 KWh/m²/jour en juin.

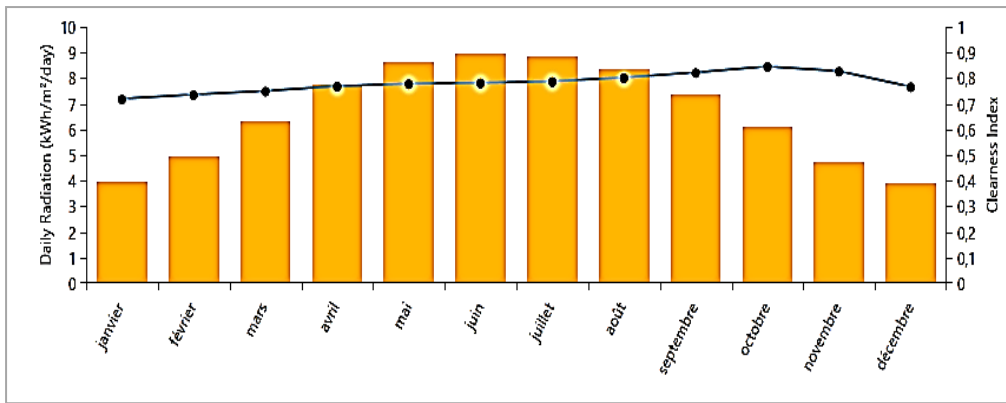


Figure III.2 : Irradiation solaire à Ain Sefra.

La figure III.3 présente la moyenne des températures dans la région d’Ain Sefra. La température mensuelle atteint son minimum en décembre estimé à 7,260°C et son maximum de 34,860°C en aout en 2020.

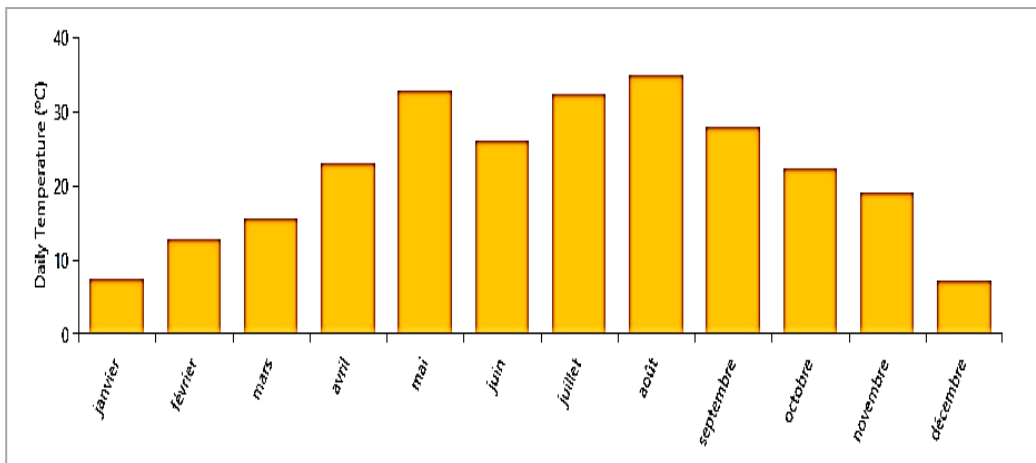


Figure III.3 : Température ambiante à Ain Sefra.

La figure III.4 montre la vitesse moyenne annuelle des vents dans la région d’Ain Sefra. La vitesse du vent est considérée comme relativement faible tout au long de l’année. Décembre est le mois le plus venteux avec une vitesse du vent de 4,940 m/s et janvier est le mois le moins venteux de l’année avec une vitesse de 1,830 m/s pour l’année 2020.

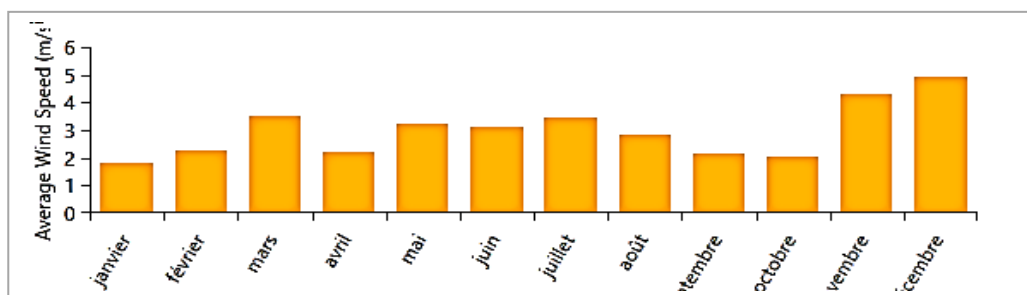


Figure III.4 : vitesse du vent à Ain Sefra.

III.4. Topologie du réseau électrique :

La province de Naama est reliée par trois lignes de 220 KV, deux lignes avec la province de Bechar et l'autre avec la province de Saida. La province d'El Bayadh est alimentée par deux lignes de 60 KV, la première depuis le département de Saïda et la seconde depuis Mecheria via Elbiodh Sidi Chikh. Enfin, Ain Sefra est alimentée par une ligne 60 KV depuis Naama comme illustre la figure III.5. [118]

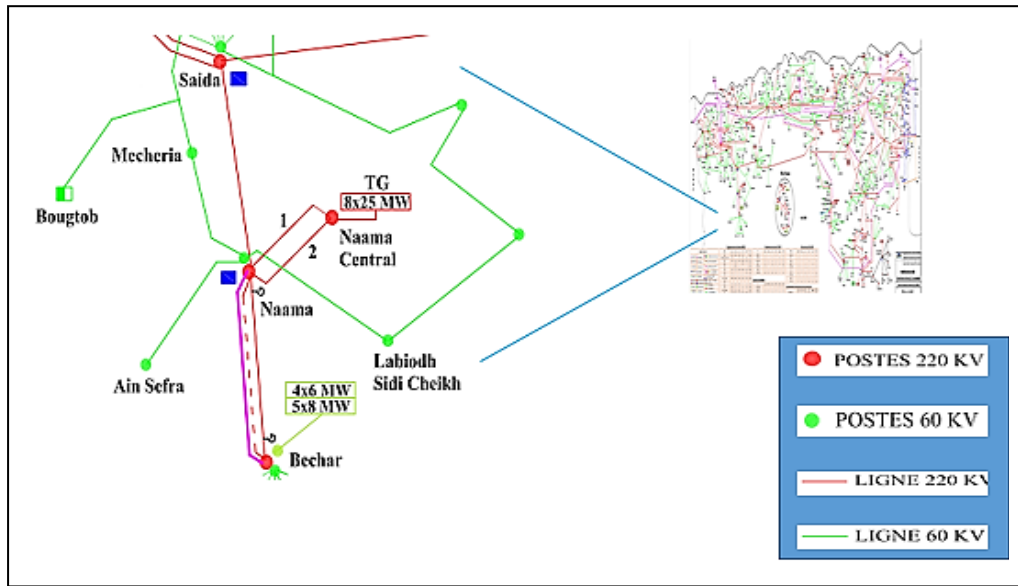


Figure III.5 : Réseau électrique 400KV dans l'ouest de l'Algérie. [118]

III.5. Présentation de l'outil de simulation (HOMER) :

C'est un outil d'optimisation des systèmes à base d'énergie renouvelable mis au point par le National Renewable Energy Laboratory (NREL), a été utilisé pour modéliser la faisabilité technique et économique du système hybride. La figure III.6 illustre l'interface du logiciel HOMER que nous avons utilisé pour notre étude.

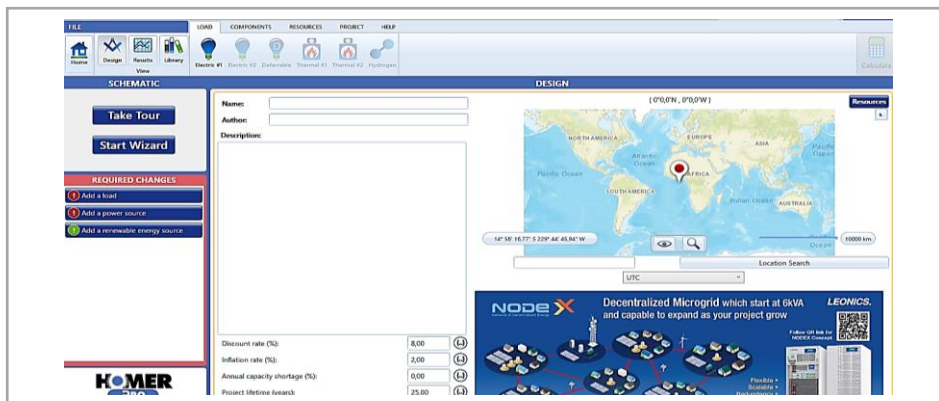


Figure III.6 : Interface du logiciel HOMER.

Il effectue des simulations horaires de toutes les combinaisons possibles de composants saisis et classe les systèmes en fonction de critères définis par l'utilisateur, tels que le coût de l'énergie (**COE**) ou les coûts en capital (**CC**). Il effectue la simulation, l'optimisation et l'analyse de sensibilité comme indique la figure III.7. [119]

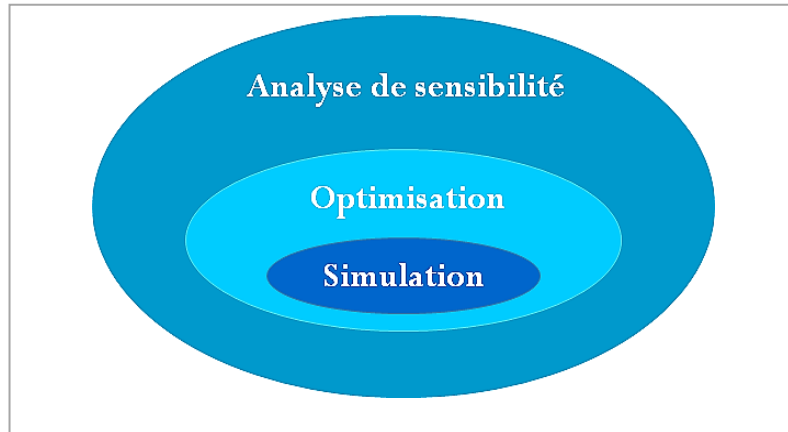


Figure III.7 : Opérations du HOMER. [119]

Dans le cadre de cette étude, où le système d'alimentation hybride comprend des génératrices **PV**, des éoliennes, des batteries de stockage, et un générateur diesel, Homer déterminera la configuration optimale possible pour le système d'alimentation qui peut répondre à la demande de charge sur toute l'année.

L'analyse est basée sur l'estimation du coût d'installation, du coût de remplacement, du coût d'exploitation et d'entretien, et ainsi de suite avec une grande fiabilité du système pour satisfaire la demande de charge.

Dans les études de dimensionnement, la fonction objective est généralement considérée comme une équation de coût. Le coût localisé de l'énergie (**LCOE**), le coût net actuel total (**TNPC**), et le coût total annualisé (**CTA**) sont les méthodes d'évaluation économique les plus courantes. **TNPC** est la somme du coût net actuel (**CNP**) de composants. A l'aide du logiciel d'analyse technico-économique **HOMER**, il est possible de choisir la configuration la plus appropriée du système énergétique hybride qui est basé sur les différents coûts.

- **Coût énergétique (COE) :**

Homer définit le coût d'énergie (**COE**) défini par l'équation III.1, comme le coût moyen par kWh d'énergie électrique utile produite par le système. Pour calculer le **COE**, **HOMER** divise le coût annualisé de production d'électricité (le coût annualisé total moins le coût de la charge thermique) divisé par la charge électrique totale saisie, en utilisant l'équation suivante :

$$COE = \frac{C_{Ann.tot} - C_{Th} \times H_{Th}}{E_{Prod}} \quad (III.1)$$

AVEC

$C_{Ann, tot}$: Coût total annuel du système (€/an).

C_{Th} : Coût thermique (€/Kwh).

H_{Th} : Charge totale thermique (Kwh/an).

E_{Prod} : Charge électrique totale (Kwh/an).

Le deuxième terme ($C_{Th} \times H_{Th}$) est la part du coût annualisé qui résulte de la charge thermique.

Dans les systèmes qui ne se servent pas de charge thermique ; ce terme sera égal à zéro.

- **Coût net actuel total (TNPC) :**

Le coût du cycle de vie du système est représenté par le coût net actuel (CNP), qui comprend les coûts en capital, de remplacement, d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts de carburant pendant leur durée de vie utile. Le coût net actuel total (TNPC) représenté par l'équation (III.2) est la principale sortie économique d'HOMER.

C'est la valeur par laquelle il classe toutes les configurations du système dans les résultats d'optimisation et la base à partir de laquelle il calcule le coût total annuel et le coût d'énergie.

Cependant, la configuration du système basée sur le TNPC dépend des variables de sensibilité (c'est-à-dire les contraintes du système, le prix des composants...) choisies par le concepteur. Dans ce contexte, le processus d'optimisation est répété pour chaque sélection de variables de sensibilité. [115]

$$NPC = \frac{C_{tot}}{CRF(i,n)} \quad (III.2)$$

Avec :

C_{tot} est le coût total annuel (€/an) ; Il s'agit de la somme des coûts annualisés de chaque équipement du réseau électrique, y compris les coûts en capital, et les coûts O&M. Il comprend également le coût de remplacement et le coût du carburant.

CRF : Facteur de recouvrement du capital de l'investissement qui est exprimé par l'équation III.3.

$$CRF(i, n) = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (III.3)$$

Avec :

n : est la durée de vie du projet.

i : Taux d'intérêt en pourcentage, qui est calculé par l'équation (III.4) :

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (\text{III.4})$$

Où :

i (%) est le taux d'intérêt nominal et f est le taux d'inflation annuel en (%).

Une capacité unique qu'offre **HOMER** est la capacité de trouver la configuration optimale basée sur les estimations de prix ainsi que d'effectuer une analyse de sensibilité pour aider à comprendre les compromis entre différentes technologies et considérations économiques ; il effectue des milliers de simulations horaires pour la meilleure correspondance possible entre la charge et l'alimentation afin de concevoir un système optimal.

III.6. Configuration du système :

Les travaux de recherche actuels sur les systèmes hybrides **PV/Eolien/Diesel** avec **stockage** se concentrent sur la détermination du dimensionnement optimal des modules **PV**, des éoliennes, de la capacité des batteries de stockage et de la capacité des générateurs diesel. Toutefois, l'inconvénient de ces systèmes est dû à leurs coûts d'investissement élevé par rapport à celui des sources d'énergie conventionnelles.

C'est pourquoi de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'optimisation. Le système doit donc être conçu de manière optimale afin de réduire son coût en capital et pour délivrer un kWh de prix minimum et avec faible émission.

Alors, l'objectif du problème d'optimisation est de minimiser le coût du système et de déterminer le dimensionnement optimal du système hybride en fonction de son coût unitaire.

[115]

Pour notre travail, nous avons étudié le même système hybride PV/Eolien/Diesel avec deux configurations : connecté au réseau et autonome.

III.6.1. Critères de choix :

Le processus d'optimisation consiste à déterminer la valeur optimale d'une variable dite de décision choisie par le concepteur et sur laquelle il a un contrôle optimal et pour laquelle Homer peut prendre en compte plusieurs valeurs possibles dans son processus d'optimisation. Dans notre étude, les variables de décision comprennent :

- La taille du générateur **PV**.
- La taille de l'éolienne.
- La taille du générateur diesel.
- Le nombre des batteries.
- La taille du convertisseur.
- Prix de l'électricité du réseau (cas de connexion avec le réseau).

A l'aide du logiciel d'analyse technico-économique **HOMER**, il est possible de choisir la configuration la plus appropriée du système énergétique hybride qui est basé sur les différents coûts. [115]

III.6.2. Etude du système :

III.6.2.1. Profil de charge :

Le tableau III.4 représente la puissance active par heure.

Tableau III.4 : Puissance active par heure.

Heures	1	2	3	4	5	6	7	8
Puissance (KW)	578,77	519,30	460,69	435,86	435,00	462,50	471,35	583,24
Heures	9	10	11	12	13	14	15	16
Puissance (KW)	681,72	778,48	994,18	951,55	945,37	905,41	932,05	903,69
Heures	17	18	19	20	21	22	23	24
Puissance (KW)	965,82	1035,00	1003,98	951,55	920,53	943,65	887,71	961,52

Alors, le profil de charge journalière de notre système donné par **HOMER** est illustré par la figure III.8. La consommation journalière est estimée à **18457,28 kWh/jour** et un pic à **18:00** heures de 1035,000 kW.

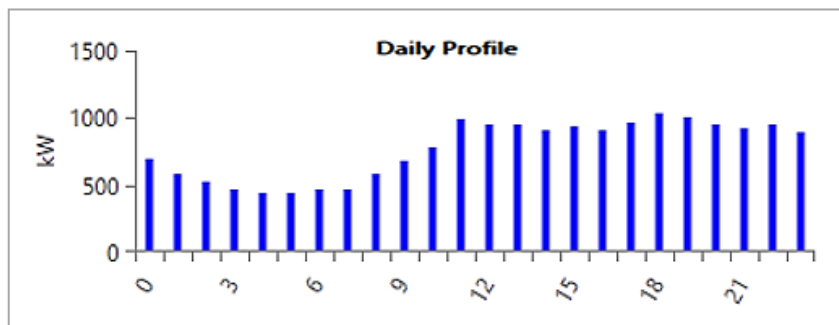


Figure III.8 : Profil de charge journalière **HOMER**.

Et la figure III.9 représente la consommation mensuelle avec un pic de 1967,75 kW au mois de juillet.

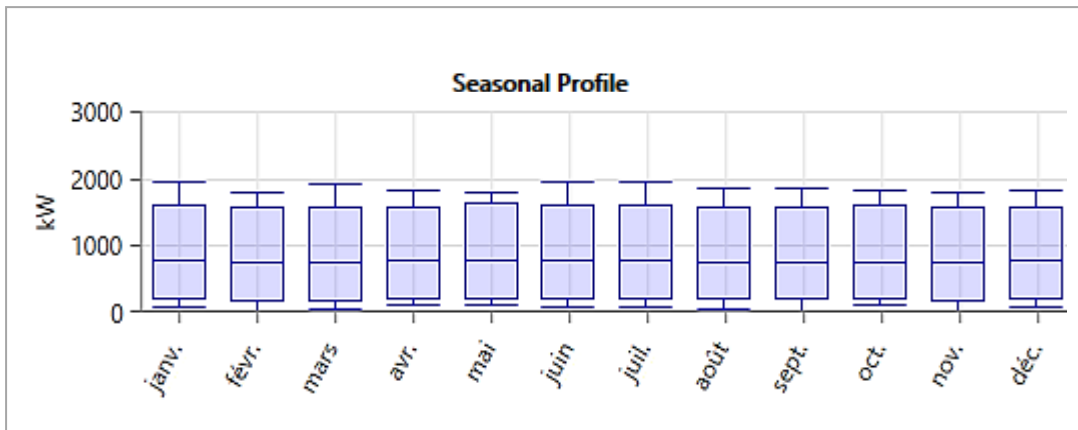


Figure III.9 : Profil de charge dans une année sur HOMER.

III.6.2.2. Système hybride PV/Eolien/Diesel/Batterie connecté au réseau électrique :

Le modèle hybride proposé tel qu'il est mis en œuvre dans l'outil de simulation HOMER est illustré sur la figure III.10.

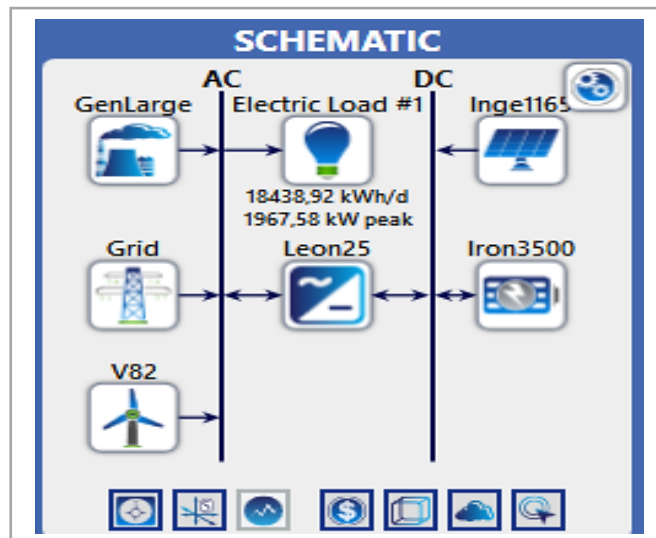


Figure III.10 : Architecture du système.

III.6.2.3. Caractéristiques techniques des composants utilisés :

Nous avons basé pour le choix des composants sur les données météorologiques, la consommation journalière et les différents coûts des composants et la participation du réseau électrique. Le tableau III.5 donne les caractéristiques techniques des composants.

Tableau III.5 : Caractéristique techniques des composants utilisés

Panneau photovoltaïque	
Nom	Inge team with Generic PV
Puissance (KW)	1164,1
Température de fonctionnement (°C)	45
Rendement (%)	17,3
Durée de vie (an)	25
Eolienne	
Nom	Vestas V82
Puissance (MW)	1.65
Durée de vie (an)	25
Batterie de stockage	
Nom	Iron Edison LFP 3500Ah
Puissance (KW/h)	168
Capacité nominal (Ah)	$3,5 \times 10^3$
Tension (V)	48
Courant de charge maximum (A)	1000
Courant de décharge maximum (A)	1000
Générateur diesel	
Nom	Generic Large Genset
Puissance (KW)	2000
Prix du carburant (€/L)	0,18
Durée de vie (heures)	15000
Convertisseur	
Nom	Leonics MTP-413F
Puissance (KW)	25
Durée de vie (an)	10

Et le tableau III.6 donne les coûts de chaque composant .

Tableau III.6 : Les coûts de composants.

Coût \ Composant	Coût d'installation (€)	Coût de remplacement (€)	Coût d'opération et de maintenance O&M (€ / an)
PV	3 000,00	3 000,00	10,00
Eolienne	10 000,00	10 000,00	500,00
Batterie	136500,00	136500,00	27300,00
Générateur diesel	300	300	0,01
Convertisseur	600	600	120
Réseau électrique	Prix d'achat de l'électricité (€ /Kwh)		0,026
	Prix de vente de l'électricité (€ /Kwh)		0,052

❖ **Résultats et discussions :**

Une fois toutes les données entrées, il faut lancer la simulation sur **HOMER** et en fonction du coût net actuel total de production (**TNPC**), les résultats sont affichés, avec la solution la moins chère en premier.

➤ **Analyse technico-économique :**

Nous avons trouvé 16 solutions de configuration et dimensionnement du notre micro-réseau comme illustre la figure III.11













	COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)
	-0,0131 €	-2,01 €M	-156 220 €	10 000 €	64,2
	-0,0129 €	-1,99 €M	-156 041 €	28 000 €	64,9
	-0,0102 €	-1,58 €M	-134 771 €	164 500 €	65,7
	-0,0101 €	-1,55 €M	-167 061 €	610 000 €	64,2
	-0,00993 €	-1,53 €M	-166 882 €	628 000 €	64,9
	-0,00981 €	-1,51 €M	-129 498 €	161 500 €	64,0
	-0,00725 €	-1,12 €M	-145 612 €	764 500 €	65,7
	-0,00683 €	-1,05 €M	-140 339 €	761 500 €	64,0
	0,0260 €	2,26 €M	174 985 €	0,00 €	0
	0,0264 €	2,29 €M	176 119 €	18 000 €	1,58
	0,0312 €	2,71 €M	197 987 €	154 500 €	3,25
	0,0313 €	2,72 €M	164 145 €	600 000 €	0
	0,0317 €	2,75 €M	165 278 €	618 000 €	1,58
	0,0318 €	2,76 €M	202 025 €	151 500 €	0,934
	0,0365 €	3,17 €M	187 147 €	754 500 €	3,25
	0,0370 €	3,22 €M	191 184 €	751 500 €	0,934

Figure III.11 : Solutions du système.

Dans le processus d'optimisation, **HOMER** simule chaque configuration du système. Dans notre étude, nous sommes basés sur deux caractères :

- Le coût **NPC** et le coût initial du système.
- Le pourcentage d'intégration des renouvelables dans le système.

La figure III.11 montre que le résultat optimal (meilleur) est obtenu lorsque le système PV/Eolien est fonctionné avec le réseau ; le coût **NPC** = **-1,99 €M**, le coût initial = **28000 €**.

Cette configuration devrait alimenter le site en électricité et lui permettre de répondre à sa demande en continu tout au long de l'année.

La deuxième solution optimale est obtenu lorsque le système est composé des PV/ Eolien/Batterie avec le réseau avec un coût NPC = -1,58 €M, le coût initial = 164500 €.

✚ Scénario N° 01 : PV/Eolien connecté avec le réseau.

La figure III.12 représente la production mensuelle de chaque composant.

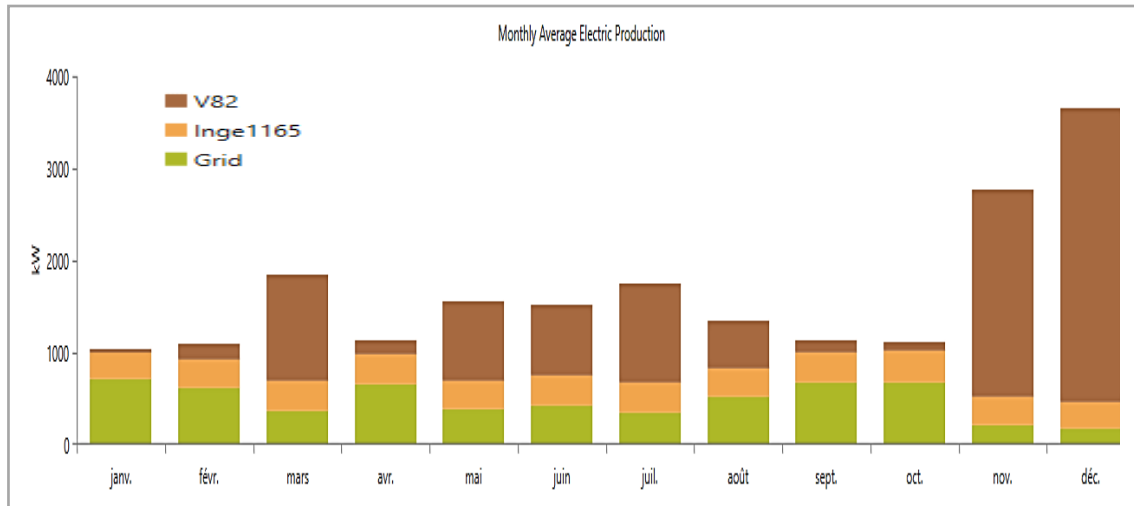


Figure III.12 : Production mensuel moyenne par élément.

La production de chaque élément est représentée sur le tableau III.7.

Tableau III.7 : Energie annuelle produite par chaque générateur.

Production	Kwh/an	%
PV	2 788 532	19,1
Eolienne	7 621 190	52,2
Réseau	4 180 323	28,7
Total	14 590 046	100

D’après la figure III.12 et le tableau III.7, on remarque que 71,3 % de l’énergie est produite par les générateurs à énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques et éoliennes), donc une diminution de l’effet de serre pour notre planète. Une autre remarque constatée est la variation de la production d’énergie pour chaque générateur durant l’année, il apparait que le générateur éolien participe avec une grande puissance produite dans la saison du printemps et hiver ; cette puissance se diminue avec la diminution de vitesse du vent. Cependant la production de générateur photovoltaïque augmente par la présence d’éclairement important. La production du réseau s’augmente dans le même effet pour satisfaire la demande d’énergie de la charge.

Les différents coûts du système sont représentés sur le tableau III.8

Tableau III.8 : Les coûts des composants du système hybride.

	Coût d'installation €	Coût de remplacement €	Coût O&M €	Sauvetage €	Total €
Réseau	/	/	-2 075 446,50	/	-2 075 446,50
PV	3 000,00	/	129,28	/	3 129,28
Convertisseur	15 000,00	13 251,56	38 782,55	-1 796,68	65 237,43
Eolienne	10 000,00	3 188,07	6 463,76	-1 796,68	17 855,15
Système	28 000,00	16 439,64	-2 030 070,92	-3 593,37	-1 989 224,65

La production d'énergie pour chaque générateur est illustrée comme suit

- **Le générateur photovoltaïque :**

La production des panneaux PV est représentée sur la figure III.13.

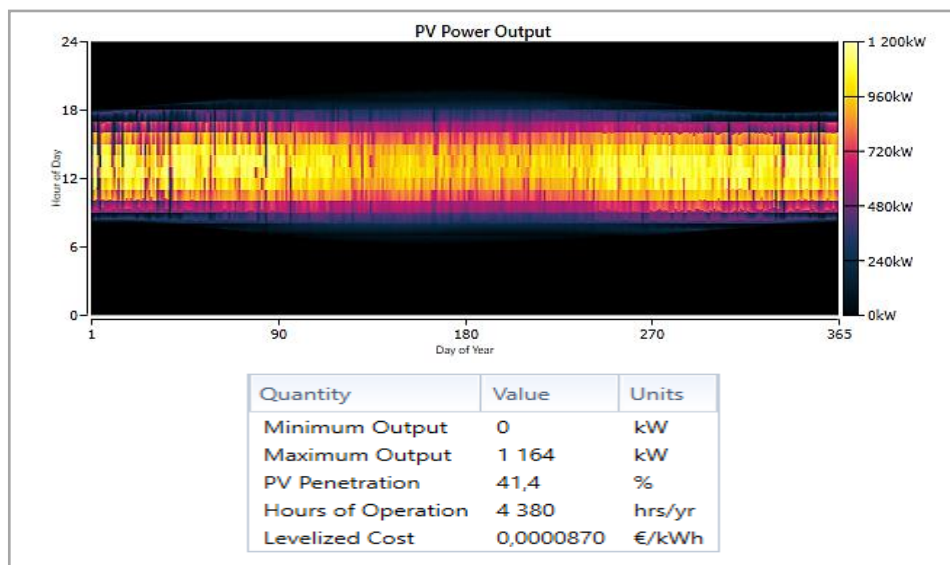


Figure III.13 : Production des panneaux PV.

Le logiciel HOMER offre des graphes qui nous aident à voir plus clairement les informations utiles de chaque heure de l'année. Chaque heure est présentée par une couleur qui simule une information précise d'une valeur de données.

D'après la figure III.13, et selon l'échelle à droite, la couleur noire représente les périodes de l'arrêt du générateur PV. La couleur bleue pour les périodes à très faible production et le jaune pour celles à forte production. Le champ PV fonctionne 4380 heures durant l'année avec un pourcentage de l'ordre de 41,4%. Le générateur PV produit de l'énergie selon le profil de charge journalière et l'irradiation solaire, ce qui introduit en parallèle le fonctionnement du générateur éolien ou bien le recours au réseau pour répondre à la demande de charge.

- **Le générateur éolien :**

La production des éoliennes est représentée sur la figure III.14.

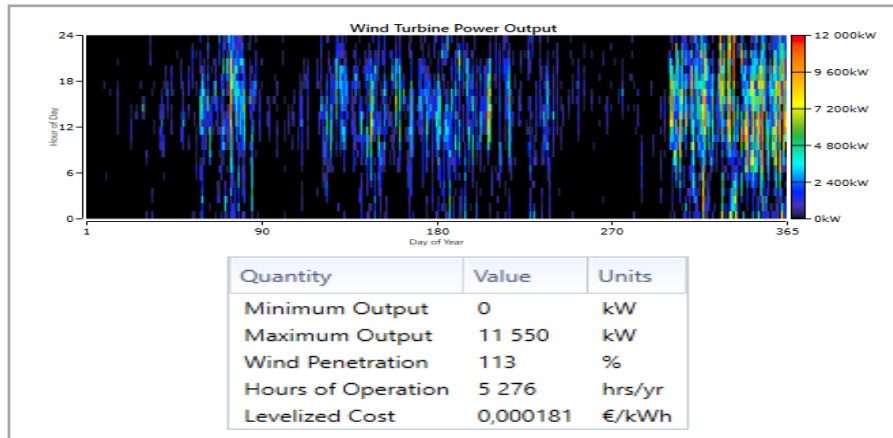


Figure III.14 : Production des éoliennes.

A partir de la figure III.14, la production de l'énergie éolienne se bénéficie des grandes valeurs mars, décembre et novembre, ce qui est bien traduit avec des couleurs bien clair, contrairement aux autres mois où la vitesse de vent se diminue.

- **Le réseau électrique :**

Les figure III.15 et la figure III.16 indiquent respectivement l'énergie achetée auprès du réseau et l'énergie vendue au réseau.

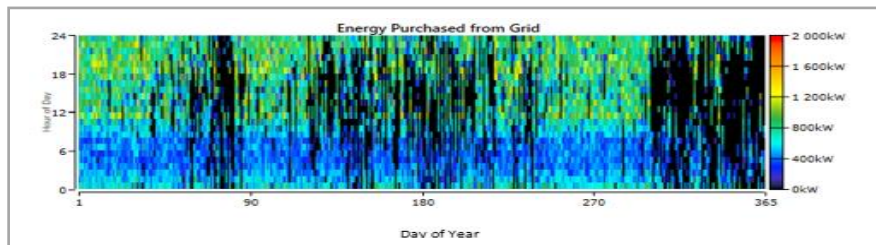


Figure III.15 : Energie achetée auprès du réseau.

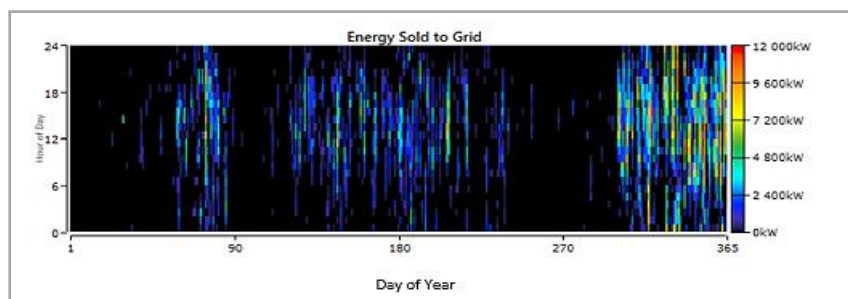


Figure III.16 : Energie vendue au réseau.

Et le tableau III.9 donne toutes les différentes énergies par mois.

Tableau III.9 : Données énergétiques du réseau.

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)
January	532 490	6 962
February	412 118	30 104
March	268 082	542 797
April	466 762	23 449
May	283 215	377 087
June	308 796	311 610
July	264 085	512 022
August	383 789	174 431
September	478 069	17 182
October	506 973	15 991
November	149 864	1 232 229
December	126 081	1 933 701
Annual	4 180 323	5 177 563

D’après le tableau III.9, la quantité totale d’électricité achetée du réseau (4180323 kWh) durant une année est inférieure à la quantité totale d’électricité vendue au réseau (5177563kWh), avec un excès d’électricité annuel de 18.4%.

- **Scénario N°02 : PV/Eolienne/Batterie et réseau :**

C’est la deuxième solution optimale obtenu dans cette première configuration (système connecté au réseau). La production mensuelle du système est illustrée par la figure III.17

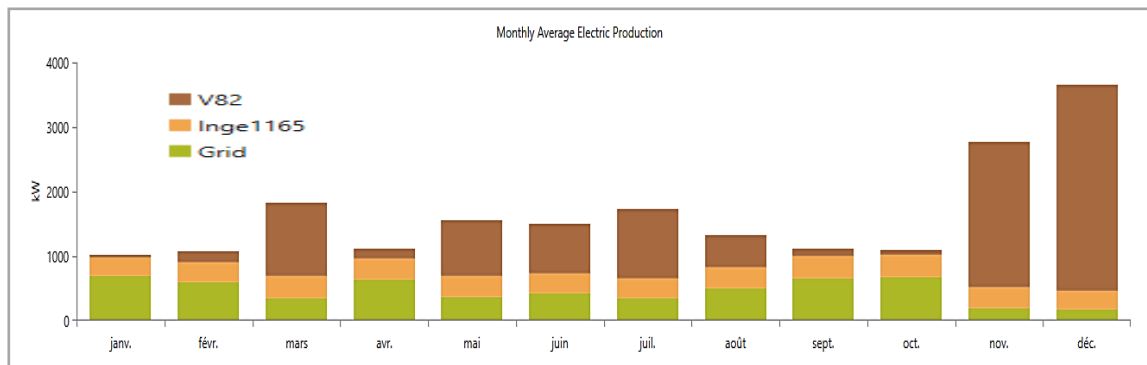


Figure III.17 : Production mensuel moyenne par élément.

La production de chaque élément est représentée sur le tableau III.10.

Tableau III.10 : Production électrique de chaque composant.

Production	Kwh/an	%
PV	2 788 532	19,2
Eolienne	7 621 190	52,6
Réseau	4 091 030	28,2
Total	14 500 752	100

D’après le tableau III.10, et par comparaison au scénario N°01, l’intégration des batteries au système donne des avantages tels que la diminution de participation du réseau. Donc l’énergie sera produite par les énergies renouvelables. La production des panneaux PV et éolienne augmente pour permettre aux batteries de stocker de l’énergie afin de la restituer si la demande de charge augmente. La participation des batteries donne une nouvelle valeur du coût O&M du réseau qui est représentés sur le tableau III.11.

Tableau III.11 : coûts du réseau en fonction de l’intégration des batteries

	Coût d’installation €	Coût de remplacement €	Coût O&M €	Sauvetage €	Total €
Réseau	/	/	-2 121 222,09	/	-2 121 222,09
Batterie	136 500,00	/	352 954,24	-32 208,04	457 246,20

- **Les bancs des batteries :**

La figure III.18 donne l’état de charge des batteries.

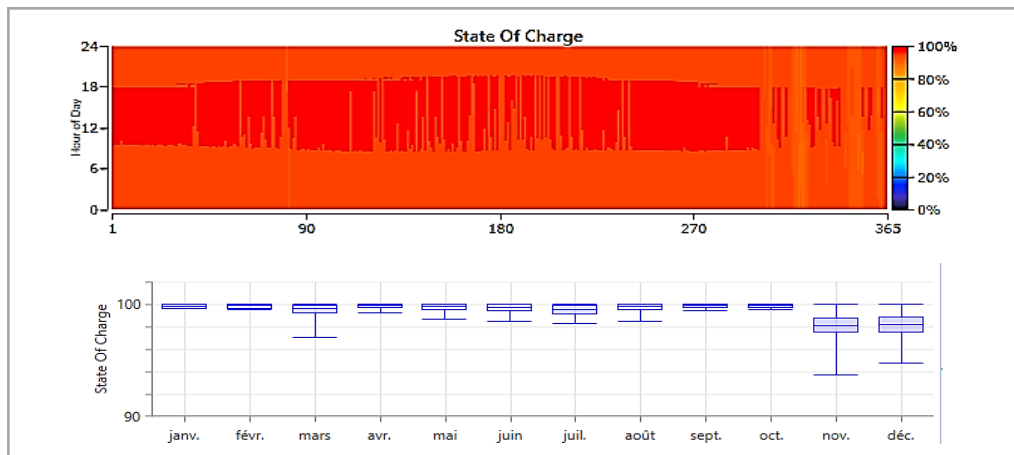


Figure III.18 : Etat de charge des batteries.

Les batteries sont introduites en parallèle avec le fonctionnement du système ou bien le recours d’énergie stockée dans les batteries lorsque la production des générateurs **PV** est nulle (pas d’ensoleillement solaire) et selon le profil de charge journalière afin de répondre à la demande de charge.

D’après la figure III.18, on remarque que l’état de charge des batteries diminué au mois de mars, novembre et décembre quand la production d’énergie et obtenues par les énergies renouvelables (générateur **PV** et générateur éolien) beaucoup plus que le réseau électrique.

Donc pour répondre à la consommation journalière, le manque d’énergie est compensé par les batteries.

• **Le réseau électrique :**

La différence entre le premier et le deuxième scénario est le coût d'énergie puisque la production du réseau diminue, (28,2% par rapport à 28,7% du premier scénario). Le tableau III.12 illustre la production et le cout d'énergie de chaque mois.

Tableau III.12 : Production du réseau par moi.

Month	Energy Purchased (kWh)	Energy Sold (kWh)
January	521 639	6 987
February	403 202	30 497
March	261 583	545 888
April	458 167	23 615
May	276 452	378 834
June	302 277	313 169
July	257 936	514 282
August	376 603	176 053
September	469 141	17 305
October	497 196	16 248
November	144 762	1 237 473
December	122 073	1 940 660
Annual	4 091 030	5 201 011

D'après le tableau III.12, on observe que la quantité totale d'électricité achetée du réseau (4091030 kWh) durant une année est inférieure à la quantité totale d'électricité vendue au réseau (5201011kWh), alors que l'excès annuel diminue (17,6 %) car la production du réseau dans ce scénario est inférieure par rapport au premier scénario.

• **Le convertisseur :**

La figure III.19 représente les graphes de production du même convertisseur pour les deux scénarios.

(a) : Scénario N°01

(b) : Scénario N°02

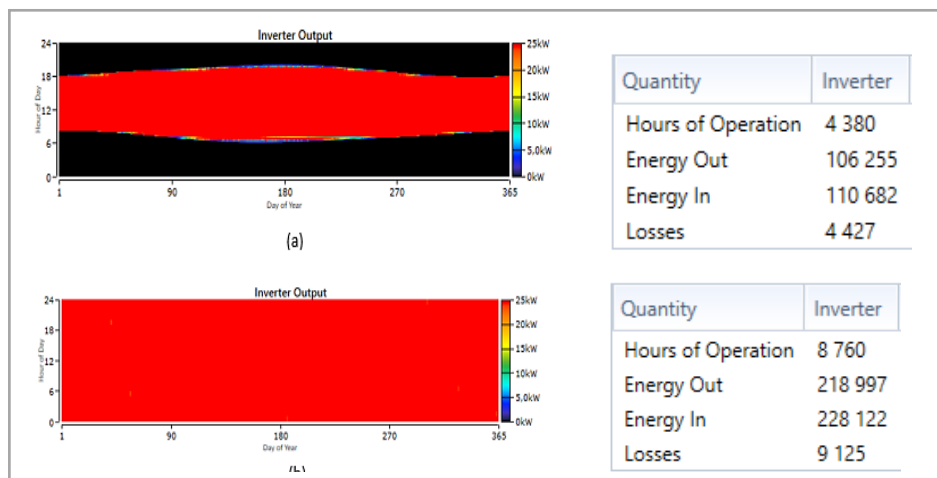


Figure III.19 : Production du convertisseur.

D’après la figure III.19, on remarque que les heures d’opération du convertisseur sont élevées dans le deuxième scénario (avec batterie) au premier (sans batterie) car il doit être toujours contrôlé la tension du système et des batteries afin de garder leurs sécurités.

• **Les émissions :**

L’étude des émissions est une étape importante puisque l’objectif principal des énergies renouvelable est de réduire au maximum l’effet de serre et de produire de l’électricité à partir des ressources propres. La figure III.20 représente les émissions des deux scénarios :

(a) : scénario N°01.

(b) : scénario N°02

Quantity	Value	Units	Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	2 641 964	kg/yr	Carbon Dioxide	2 585 531	kg/yr
Carbon Monoxide	0	kg/yr	Carbon Monoxide	0	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr	Unburned Hydrocarbons	0	kg/yr
Particulate Matter	0	kg/yr	Particulate Matter	0	kg/yr
Sulfur Dioxide	11 454	kg/yr	Sulfur Dioxide	11 209	kg/yr
Nitrogen Oxides	5 602	kg/yr	Nitrogen Oxides	5 482	kg/yr

(a)
(b)

Figure III.20 : Quantité des émissions.

D’après la figure, on remarque que la quantité de dioxyde de carbone, de dioxyde de soufre et d’oxydes d’azote libérée par kWh de puissance du réseau consommée par le système, en grammes / kWh est diminuée dans le scénario N°02.

❖ Par comparaison des deux scénarios, on conclure qui économiquement le **scénario N°01** est la solution la plus optimale à cause de son faible coût de production (NPC), alors que l’étude technique favorise le **scénario N°02** grâce au grand pourcentage de participation des énergies renouvelables à la production énergétique (71,8%) par rapport au **scénario N°01** et environnemental, il a des faibles valeurs des émissions.

III.6.2.4. Système hybride PV/Eolien/Diesel/Batterie autonome :

Le schéma de ce deuxième système est représenté sur la figure III.21.

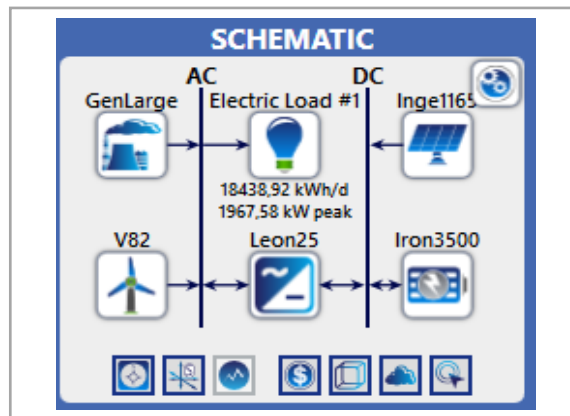


Figure III.21 : Architecture du système hybride.

Ce deuxième système autonome possède les configurations représentées sur la figure III.21. Le logiciel HIMER nous donne 8 solutions ,5 sont possibles à cause du signe interdit qui signifie que ce système a une pénétration renouvelable suffisamment élevée causer un problème de stabilité.

Puisque notre objectif est de choisir la solution optimale économiquement et techniquement et d’après la figure III.22, nous avons choisi la quatrième solution comme la plus optimale (PV/Eolien/Diesel avec stockage).

					COE (€)	NPC (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren Frac (%)
⚠	☀️	🌪️	🏠	🔋	0,107 €	9,28 €M	670 392 €	610 000 €	25,8
⚠	☀️	🌪️	🏠	🔋	0,107 €	9,30 €M	670 665 €	628 000 €	26,7
		🌪️	🏠	🔋	0,112 €	9,71 €M	691 867 €	761 500 €	27,6
	☀️	🌪️	🏠	🔋	0,112 €	9,71 €M	691 864 €	764 500 €	27,6
			🏠	🔋	0,134 €	11,6 €M	854 349 €	600 000 €	0
⚠	☀️		🏠	🔋	0,134 €	11,7 €M	854 020 €	618 000 €	0
	☀️		🏠	🔋	0,139 €	12,1 €M	875 386 €	754 500 €	0,148
			🏠	🔋	0,139 €	12,1 €M	878 897 €	751 500 €	0

Figure III.22 : Solution du système.

➤ Analyse technico-économique :

La figure montre que le coût NPC = 9,71 €M, le coût initial = 764500 €. La production mensuelle moyenne par élément est représentée sur la figure III.23

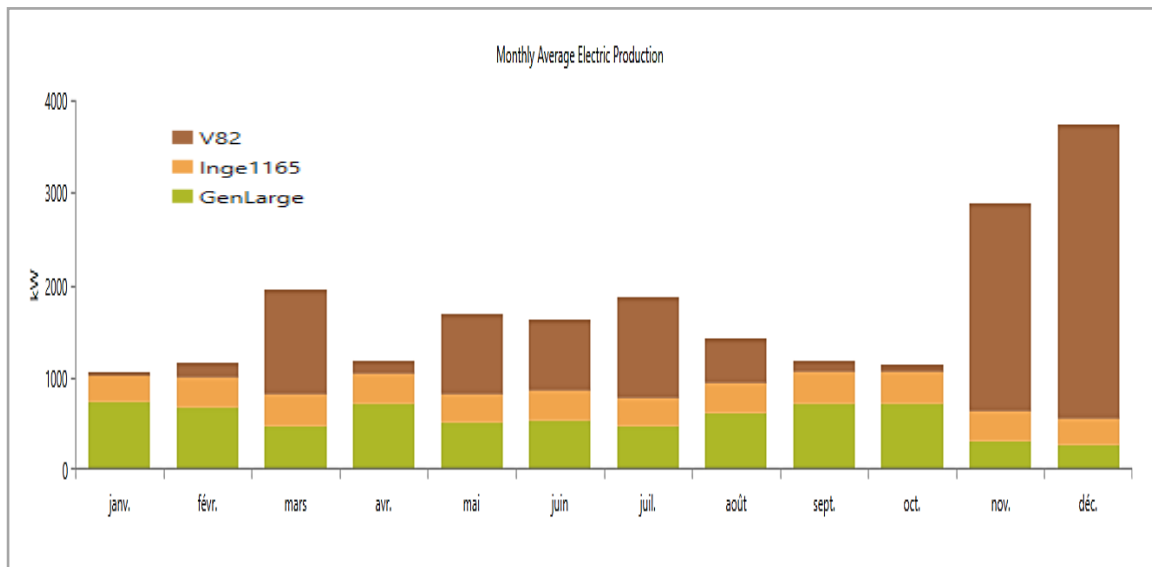


Figure III.23 : production électrique par mois de chaque composant.

La production de chaque élément est représentée sur le tableau III.13.

Tableau III.13 : Production par élément.

Production	Kwh/an	%
PV	2 788 532	18,2
Eolienne	7 621 190	49,9
Générateur diesel	4 875 016	31,9
Total	15 284 738	100

D’après la figure III.23 et le tableau III.13, on remarque que 69,1 % de l’énergie est produite par les générateurs à énergies renouvelables (panneaux photovoltaïques et éoliennes),

L’excès d’électricité donnée par le tableau III.14.

Tableau III.14 : L’excès de l’électricité du système.

Quantité	Kwh/an	%
Excès d’électricité	8 545 514	55,9

Les différents coûts sont représentés sur le tableau III.15.

Tableau III.15 : Les coûts de chaque composant.

	Coût d'installation €	Coût de remplacement €	Coût O&M €	Carburant €	Sauvetage €	Total €
Générateur Diesel	600 000,00	3 465 076,65	1 862 338,03	3 237 228,56	/	9 164 643,25
PV	3 000,00	/	129,28	/	/	3 129,28
Batterie	136 500,00	/	352 954,24	/	-32 537,35	456 916,89
Convertisseur	15 000,00	13 251,56	38 782,55	/	-1 796,68	65 237,43
Eolienne	10 000,00	3 188,07	6 463,76	/	-1 796,68	17 855,15
Système	764 500,00	3 481 516,29	2 260 667,86	3 237 228,56	-36 130,72	9 707 781,99

- **Bancs de Batterie :**

L'état de charge des batteries dans cette deuxième configuration est illustré sur la figure III.24.

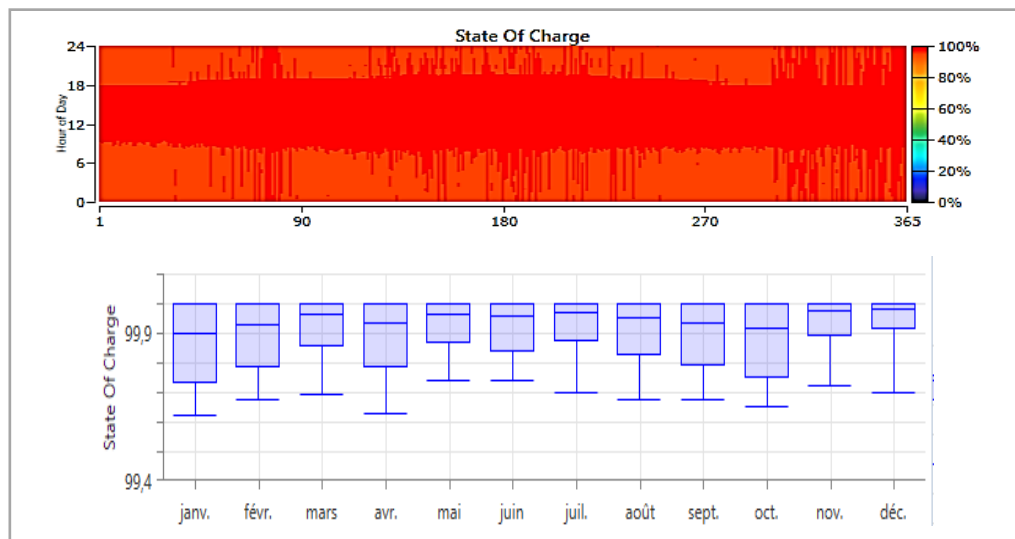


Figure III.24 : Etat de charge des batteries.

La figure montre que les batteries fonctionnent presque toute l'année puisque le système est autonome et la consommation journalière est élevée (18438,92).

Durant la nuit la charge diminue et les batteries accumule l'énergie de surplus des éoliennes ou bien celle des générateur diesels ou bien les deux et les injecte au matin durant le moment de pointe.

- **Générateur Diesel :**

La production du générateur diesel et la consommation du carburant sont illustrées sur la figure III.25.

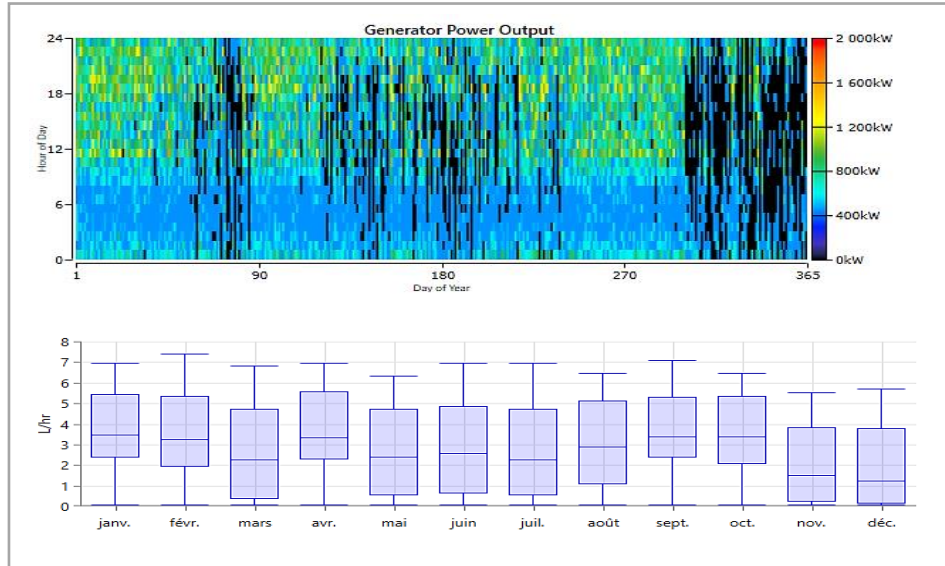


Figure III.25 : Production et consommation du carburant du générateur diesel.

Et les paramètres de fonctionnement sont représentés sur la figure III.26.

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	7 203	hrs/yr
Number of Starts	375	starts/yr
Operational Life	2,08	yr
Capacity Factor	27,8	%
Fixed Generation Cost	65,0	€/hr
Marginal Generation Cost	0,0439	€/kWh

Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	1 391 188	L
Specific Fuel Consumption	0,285	L/kWh
Fuel Energy Input	13 689 288	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	35,6	%

Figure III.26 : Paramètres du générateur diesel.

La figure III.25 et la figure III.26, nous donne la possibilité de voir la nécessité de l'utilisation des systèmes de générations d'énergies basés sur les énergies renouvelables en parallèle avec le fonctionnement du générateur diesel pour but de minimiser l'utilisation de combustible fossile.

On remarque que plus qu'on ajoute des générateurs renouvelables plus qu'on diminue l'utilisation de combustible pour la génération d'énergie électrique.

Mais dans ce deuxième système (autonome), la production des énergies renouvelable est diminué par rapport au premier système (connecté au réseau) de la même configuration (même caractéristique et même nombre des composants).

- **Le convertisseur :**

La figure III.27 montre le fonctionnement du convertisseur.

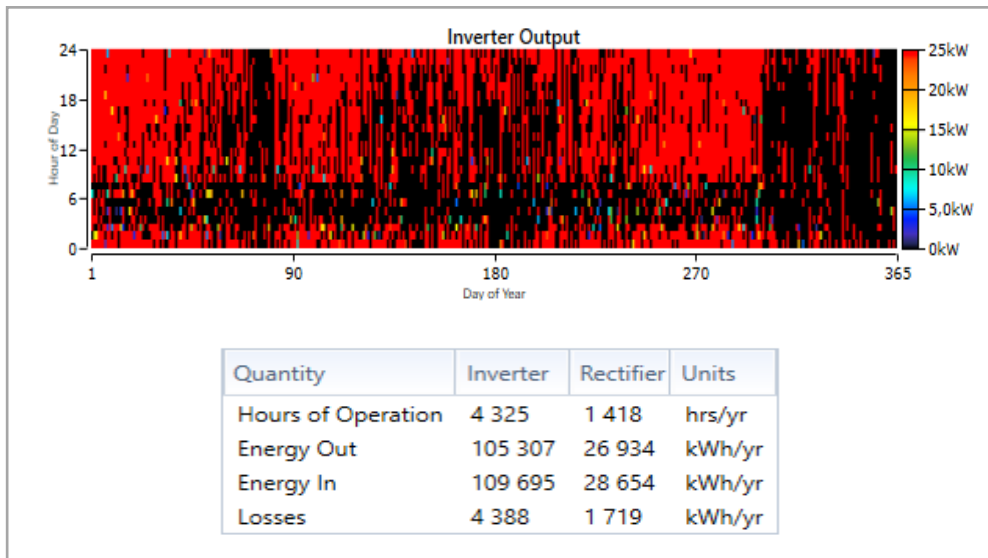


Figure III.27 : Fonctionnement du convertisseur.

On remarque d’après la figure III.27 que les heures de fonctionnement du convertisseur ainsi que les pertes sont faibles dans ce cas par rapport au premier cas.

- **Les émissions :**

Les émissions sont représentées dans la figure III.28.

Quantity	Value	Units
Carbon Dioxide	3 648 008	kg/yr
Carbon Monoxide	18 873	kg/yr
Unburned Hydrocarbons	1 002	kg/yr
Particulate Matter	161	kg/yr
Sulfur Dioxide	8 917	kg/yr
Nitrogen Oxides	3 617	kg/yr

Figure III.28 : Valeurs des émissions.

La valeur des émissions est très élevée par rapport au premier système à cause de générateur diesel qui fonctionne 7203 heures/an qui correspond à 3680578 kg/an de quantité des émissions.

- **Comparaison des deux systèmes connectés au réseau et autonome :**

Le tableau III.16 illustre les résultats technico-économiques que nous avons trouvés pour les deux configurations de notre système (connecté au réseau et autonome).

Tableau III 16 : Comparaison des résultats de l'étude des deux systèmes.

		Coût		Production (%)			Emissions
		NPC (€M)	Coût initial (€)	PV	Eolien	Réseau	Quantité (Kg/an)
Système connecté au réseau	PV/Eolien	-1,99	28000	19,1	52,2	28,7	2 659 020
	PV/Eolien /Batterie	-1,58	164500	19,2	52,6	28,2	2 602 222
Système autonome	PV/Eolien / Batterie/ Diesel	NPC (€M)	Coût initial (€)	PV	Eolien	Générateur diesel	Quantité (Kg/an)
		9,71	764500	18,2	49,9	31,9	3 680 578

D'après le tableau III.16 et les autres résultats technico-économiques que nous avons trouvées et en parallèle avec l'analyse environnementale qui a été également réalisée, visant à démontrer l'importance des énergies renouvelables dans la diminution des émissions causées par les systèmes classique de production d'énergie électrique :

On conclure que la structure d'un système hybride (PV /Eolien/Batterie) connecté au réseau est la meilleure solution qui peut satisfait la demande de charge d'une manière fiable et participe à la diminution de la diminution des émissions dans notre planète.

III.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons tenté d'examiner comment utiliser les ressources des énergies renouvelables solaire et éolienne pour l'alimentation électrique d'une commune.

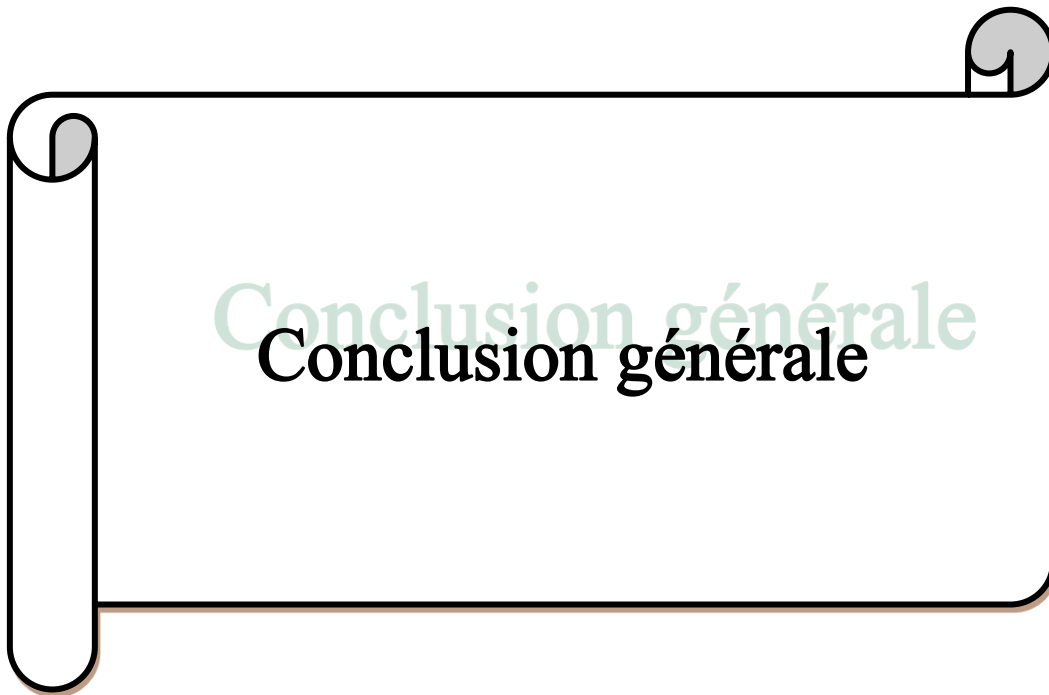
Il présente une analyse comparative d'un système d'alimentation hybride, système connecté au réseau et autonome de la région d'Ain Sefra.

L'optimisation et la simulation du système avec le logiciel HOMER nous donne les résultats qui indiquent que le site d'Ain Sefra a un bon potentiel pour le vent et l'énergie solaire.

Ils illustrent également le bon fonctionnement de l'approche proposée pour fournir les besoins électriques du système, il a été démontré que l'utilisation du système hybride PV /éolien/batterie connecté au réseau est le plus approprié et le plus rentable car il offre plusieurs avantages tels que la réduction de manière significative la dépendance à l'égard de Générateur diesel.

De plus, il contribue également à réduire les polluants, tels que les émissions de carbone, réduisant ainsi l'effet de serre.

D'autre part, il est également prouvé que l'utilisation du système hybride PV /éolien connecté au réseau pourrait être une deuxième solution économiquement qui nous permet la diminution de la dimension du stockage dont le cout est élevé et son encombrement pose la plus grande contrainte au système sur tous pour les systèmes de grande puissance.



Conclusion générale

Conclusion générale :

Les Micro-réseaux composés d'une ou plusieurs sources d'énergie renouvelables connectés au réseau ou autonomes sont une solution énergétique alternative et durable contribuant à la diminution de la consommation des énergies fossiles, ne dégageant pas de gaz à effet de serre, et permettant une régulation des flux énergétiques sur le réseau électrique à long terme.

Le dimensionnement d'un tel système d'énergie hybride est toujours nécessaire pour rendre plus compétitive l'intégration des sources d'énergies alternatives dans le bilan des grands systèmes de production d'énergie.

L'objectif de cette thèse était de trouver le système hybride optimale qui permet d'alimenter la région d'Ain Sefra d'une façon continue, et cela pour la consommation enregistrée durant l'année 2020 par l'utilisation du logiciel **HOMER**.






Afin de réaliser cet objectif, nous avons tout d'abord effectué une brève présentation sur les énergies renouvelables, notamment en Algérie, qui se caractérise par un grand potentiel d'énergies renouvelables







Une deuxième partie a mis en exergue le concept d'un micro-réseau, ses configurations ainsi que ces composants. L'accent est mis spécifiquement sur le générateur PV et éolien, son principe est détaillé, caractérisé et modélisé en vue d'une utilisation dans un système de gestion énergétique.

Et nous avons terminés notre travail par la simulation de deux configuration (système connecté au réseau et autonome) grâce à quelques données d'entrée au logiciel HOMER (profils météorologiques, profils de charges, données techniques) pour trouver le meilleur système qui peut alimenter la région d'Ain Sefra sans interruption et diminuer les émissions sur notre planète.



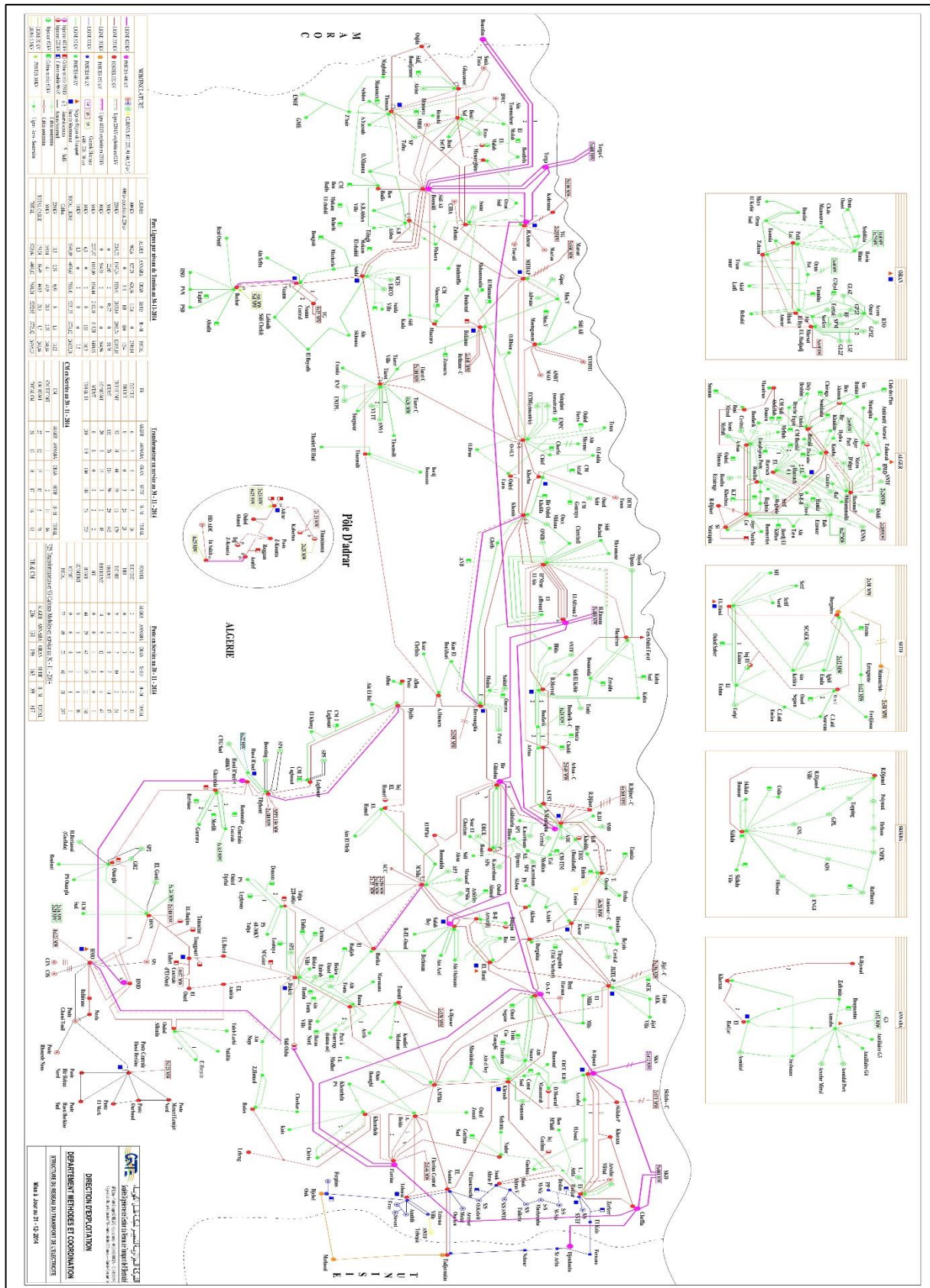
Annexe

Propriétés:		
Panneau photovoltaïque	<p>Nom : Ingeteam (1164 KVA) with Generic PV</p> <p>Abréviation : Inge 1165</p> <p>Type de panneau : Flat plate</p> <p>Capacité nominale (KW) : 1164.1</p> <p>Coefficient de température : -0.4100</p> <p>Température d'exploitation (°C) : 45</p> <p>Efficacité (%) : 17.30</p> <p>Durée de vie (années) : 20</p>	<p>PV </p> 
Eolienne	<p>Nom : Vestas V82[1.65 MW]</p> <p>Abréviation : V82</p> <p>Capacité nominale (KW) : 1650</p> <p>Durée de vie (Années) : 20</p> <p>Hauteur de moyeu (m) : 70</p>	<p>WIND TURBINE </p> 
Générateur	<p>Nom : Generic Large Genset (size - yours - own)</p> <p>Abréviation : GenLarge</p> <p>Taux de charge minimal (%) : 25</p> <p>Durée de vie (Heurs) : 15</p>	<p>GENERATOR </p>

Convertisseur	<p>Nom : Leonics MTP-413F 25kW Abréviatiion : Leon25 Entrée du convertisseur : Durée de vie (Année) : 10 Efficacité (%) : 96 Entrée du redresseur : Capacité relative (%) : 80 Efficacité (%) : 94</p>	<p>CONVERTER </p> 
Batteries	<p>Nom : Iron Edison LFP 3500Ah Abréviatiion : Iron3500 Tension nominale (V) : 48 Capacité nominale (KWh) : 168 Capacité nominale (Ah) : 3.5E+03 Efficacité aller-retour (%) : 95 Courant de charge maximal (A) : 1E+03 Courant de décharge maximal (A) : 1E+03</p>	<p>STORAGE </p> <p>LITHIUM IRON BATTERY <i>for Renewable Energy & Backup Power Applications</i></p> 
Réseau	<p>Nom : Grid Abréviatiion : Grid Prix de l'électricité du réseau (£ KWh) : 0.026 Prix de rachat du réseau (£ KWh) : 0.052</p>	<p>GRID </p> 

Données du modèle de réseau algérien 114 plus carte de GRTE :

Carte réseau 2015





Bibliographie

Bibliographie :

- [1] https://www.cairn.info/revue-responsabilite-et-environnement1-2013-1-page-75.htm?try_download=1
- [2] BELKAID, A. (2015). Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome (Doctoral dissertation).
- [3] BENSOUADI, M. S., & ARAR, S. E. (2020). Etude et simulation d'un micro réseau intelligent (microgrid) (Doctoral dissertation, Dr BOUSMAHA Imen Souhila).
- [4] ATMANIA, H. (2015). La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie : cas de la photovoltaïque (doctoral dissertation, université Mohamed Ben Ahmed. Oran).
- [5] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [6] STOYANOV, L. (2011). Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- [7] HIGUITA CANO, M. (2017). Système de gestion de l'énergie basé sur l'incertitude pour un système hybride à sources d'énergie renouvelable autonome avec production d'hydrogène (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [8] GUERROUDJ, A. BELKHIRA, A. (2020). Étude et Simulation d'un Micro-Grid (Mastre LMD)_Universite Dr .Tahar Moulay de Saïda).
- [9] TIOMO, D. (2019). Modélisation et simulation d'un système électrique hybride à jumelage hydroélectrique-solaire, avec stockage à batteries (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- [10] VERIGOU. S. (2018). Optimal Sizing of a Microgrid Including Renewable Energy sources
- [11] KHELFA, L. & MAATAOUI, L. (2017). Étude et simulation d'une éolienne à base d'une machine asynchrone doublement alimentée. Mémoire de master université Badji Mokhtar-Annaba.
- [12] Ministère de l'énergie Conception et réalisation SATINFO. Société du Groupe Sonelgaz. Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie. (2016)
- [13] Site : wikipedia.org/wiki/%c3%89nergie_renouvelable.
- [14] OMRI, A. (2016). Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie : Risques, enjeux et stratégies à adopter (Doctoral dissertation, Université Côte d'Azur ; Université de Sfax (Tunisie). Faculté des Sciences économiques et de gestion).
- [15] LILIA, A. (2012). Contribution à l'amélioration des performances des générateurs éoliens-évaluation de l'impact des énergies renouvelables sur l'environnement. Doctorat en sciences en électrotechnique, université de Batna.
- [16] SADI OUFELA, A., & ABBANE, S. (2014). Evaluation de la Puissance Aérodynamique d'une Eolienne à Axe Horizontal (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou).
- [17] COUPAN, F. (2017). Stockage pour les énergies renouvelables : évaluation et modélisation de la batterie plomb-acide (Doctoral dissertation, Université de Guyane).

- [18] SYLLA, A. M. (2013). Modélisation d'un émulateur éolien à base de machine asynchrone à double alimentation (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [19] https://www.researchgate.net/figure/Conversion-de-lenergie-cinetique-du-vent_fig1_324929383
- [20] Le fonctionnement d'un éolien syndicat des énergies renouvelables. France énergie éolienne .13–15, rue du baume 75008 paris, site : www.enr.fr
- [21] hmf.enseiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1331 ET www.energieonline.fr/schemas/eolien/mat-eoliene.jpg.
- [22] KELKOUL, B. (2011). Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation (doctoral dissertation).
- [23] GUEDIRI, A. K. (2017). Etude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension (Doctoral dissertation, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA).
- [24] CAMBLONG, H. (2003). Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable (Doctoral dissertation, Paris, ENSAM).
- [25] ABU-TABAK.N. (2008). Stabilité dynamique des systèmes électriques multi machines : Modélisation, commande, observation et simulation ». Thèse de doctorat. Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon.
- [26] IDJDARENE. K. (2008). Contrôle d'une éolienne en fonctionnement autonome basée sur une génératrice asynchrone. JCGE'08 LYON.
- [27] POITIER. (2003). Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne». Thèse de Doctorat de l'université de NANTE.
- [28] FRANCOIS. B. La turbine éolienne (Modélisation et commande) ». Master (Recherche)
Sciences et Technologies. Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de Puissance : L2EP, Lille.
- [29] DAVIGNY. A. (2007). Participation aux services système de fermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie. Thèse de doctorat en génie électrique. Université des sciences et Technologies de Lille, 2007.
- [30] SIDDO. M. (2007). Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne. Thèse d'ingénieur en électrotechnique .Université El-Harrach, Algérie.
- [31] https://www.researchgate.net/figure/Systeme-eolien-base-sur-une-GSAP_fig19_324929383
- [32] LATRECHE, M. T. (2018). Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien (Doctoral dissertation).
- [33] AZZOUZ, Tamaarat. (2015). Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. Diss. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [34] MIDA, D. (2019). Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien-Photovoltaïque». Diss. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [35] KHADRAOUI, z. (2017). Eude d'une centrale solaire thermique. Mémoire de master université Badji Mokhtar-Annaba.
- [36] <https://slideplayer.fr/slide/3204616/>
- [37] LOÏCK Nossent et LOÏCK Hamel. l'énergie solaire thermique et photovoltaïque gymnase de nyon
- [38] Questions de physique autour de l'énergie solaire. Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Centre de Saclay. Site : www.cea.fr.

- [39] https://www.researchgate.net/figure/Principe-du-chauffe-eau-solaire-monobloc-28-Chauffe-eau-a-elements-separes-La_fig26_285322379
- [40] <https://www.hellowatt.fr/blog/fonctionnement-panneau-solaire-photovoltaique/>
- [41] BOUKHERS, D. (2007). Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque. Application au pompage.
- [42] <https://viridiselec.com/photovoltaique/fonctionnement-photovoltaique/>
- [43] L'énergie solaire photovoltaïque hydro Québec reproduction autorisée avec mention de la source février.
- [44] BANDOUC, F. (2016). Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différentes technologies (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [45] NAIM, H. étude de gestion d'une mini-centrale solaire et mise au point d'un dispositif automatique de mesures, contrôles et régulation de l'énergie électrique (doctoral dissertation, université Mohamed Boudiaf. Oran.
- [46] EDF. La production d'électricité d'origine hydraulique. (2017).Site : www.edf.fr
- [47] MAIFI, I. & KERBACHE, T. (2018). Etude et modélisation d'un panneau solaire thermique photovoltaïque (doctoral dissertation, Université les frères Mantouri Canstantine).
- [48] <https://www.kartable.fr/ressources/enseignement-scientifique/cours/les-atouts-de-lelectricite/54772>
- [49] YANN ARTHUS-Bertrand. Les énergies hydrauliques. Mission énergie.
- [50] <https://www.missionenergie.goodplanet.org/fiche/les-energies-hydrauliques-2/>
- [51] BENCHEMSA.I. (2017). L'Utilisation de l'énergie thermique pour le chauffage domestique. Université Badji Mokhtar Annaba.
- [52] HABI.H. & BIBI.Y. (2016). Simulation et optimisation des performances d'un système hybride intégrant des énergies renouvelables pour la génération d'électricité (doctoral dissertation, université Akli Mouhand Oulhadj. Bouira).
- [53] BOURZAMI. A. (2019).Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue. Diss. Université Ferhat Abbas -Setif 1.
- [54] <https://sites.google.com/site/ense3ace/test-1/energie-biomasse>
- [55] MISSAOUI. A. (2018). Eude de la conversion de la biomasse en énergie par un procédé hydrothermal de carbonisation-caractérisation des produits issus des grignons d'olive (doctoral dissertation, université d'Orléans).
- [56] BENABED. B. F. Eude des propriétés thermophysiques des mélanges contenant des composés dérivés de la biomasse (doctoral dissertation).
- [57] BACHIRI, A. Etude d'une installation de chauffage géothermique. Diss. Université Mohamed Boudiaf-M'sila, 2018.
- [58] hydro Québec. (2014). L'énergie de la biomasse. Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- [59] CHABANI, Z. La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030. Diss. Université de Boumerdès-M'hamed Bougara, 2014.
- [60] ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). La géothermie Quelles technologies pour quels usages ? 2^{ème} édition. Site : www.ademe.fr
- [61] KHKHERBACHE, F. Z. (2015). Contribution à l'étude et dimensionnement d'une installation à base d'énergie géothermique pour la production d'énergie électrique (doctoral dissertation).

- [62] FANNOU, J. L. C. (2015). Analyse et modélisation d'une pompe à chaleur géothermique à expansion directe (Doctoral dissertation, École de technologie supérieure).
- [63] <https://energie.wallonie.be/fr/la-geothermie-profonde.includehtml?idc=6173>
- [64] <https://www.maxicours.com/se/cours/utilisations-possibles-de-l-energie-geothermique-par-l-homme/>
- [65] IRENA. (International renewable energy agency) Statistiques de capacité renouvelable 2020.
- [66] YASSAA. N. khelif.K.CEREFÉ.(2020) .Rapport.Transition énergétique en algérie : leçons, état des lieux et perspectives pour un développement accéléré des énergies renouvelables.Commissariat aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique, premier ministre, Alger.
- [67] SAÏAH, B. D. S. (2017). Analyse prospective de la production de l'énergie électrique en Algérie. Doctoral dissertation, université Mohamed Boudiaf. Oran.
- [68] DAAOU. Nedjari .H. (2018). L'énergie éolienne en Algérie. CDER E-mail : h.daaou@cder.dz
- [69] Dr GUERRI.O L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu. E-mail : o.guerri@cder.dz
- [70] CHERIFI.S. HADDAD.M. (2019).L'énergie solaire : un moteur du développement durable en Algérie les cahiers du Cread, vol. 35 - n° 03 .E-mail : cherifisarah9393@gmail.com
- [71] Banque mondiale, disponible sur : <http://www.banquemonde.org/>, consulté le 2 septembre 2018.
- [72] Ministère de l'énergie : <http://www.energy.gov.dz>, consulté le : 12 septembre 2018.
- [73] MENHOUDJ, S. (2018). Intégration des systèmes à énergies renouvelables dans le bâtiment : évaluation des performances énergétiques (doctoral dissertation, université Mohamed Boudiaf. Oran.
- [74] Dr. KOUADRI Boudjelthia.A.CDER. Énergies Renouvelables : un moteur principal du développement durable en Algérie développement durable en Algérie.Site : <http://www.cder.dz>
- [75] FEKRAOUI. A et ABOURICHE. M. Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie,
- [76] BENDAÏKHA .W. La climatisation géothermique : une solution adaptée à l'Algérie. (CDER)
- [77] BAOUCHI.B. Ministère de l'Énergie (APRUE). Programme d'Efficacité Énergétique en Algérie
- [78] Ministère de l'énergie et des Mine. (2015). (APRUE). Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030.Site :www.aprue.org.dz
- [79] TEWFIK. H. MALEK. R et ZOUIOUCHE. N. (2021). L'Algérie 100 % énergies renouvelables recommandations pour une stratégie nationale de transition énergétique.
- [80] <https://www.energyst.com/fr-int/solutions/micro-reseaux/>
- [81] LOTFI, H., & KHODAEI, A. (2015). AC versus DC Microgrid planning. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(1), 296-304.
- [82] GOURARI, D. (2020). Gestion des flux énergétiques dans un micro-réseau par une programmation dynamique (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).

- [83] GAGA, A. (2017). Gestion et Optimisation des Flux Energétiques dans un Micro Réseau DC Isolé.
- [84] E-CUBE. (2018). Thèse sur les Microgrids. Etude sur les perspectives stratégiques de l'énergie.
- [85] <https://solarpowerinvestor.com/microgrid-solar-closes-300m-equity-round-from-warbug-pincus/>
- [86] ADB (Asian Development Bank).2020. Handbook on Microgrids for power quality and connectivity.
- [87] THEUBOUTAMEGHE, T. A. (2019). Contribution à la mise en œuvre et à la commande d'un Microréseau de cogénération modulaire (injection de puissance et stabilisation de fréquence) (Doctoral dissertation, Université du Québec à Chicoutimi).
- [88] Les Microgrids : une opportunité de valeur pour le groupe EDF. 2017. Site : www.edf.fr
- [89] COPYRIGHT. (2018) VERIGOU. S. Optimal sizing of a microgrid including renewable energy sources.
- [90] BOUZID, A. E. M. (2017). Élaboration d'une méthode de contrôle pour améliorer la robustesse d'un micro réseau électrique (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [91] LAROUI, R., & BENATIALLAH, A. (2015). Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-ADRAR).
- [92] KEBE, A. (2013). Contribution au pré dimensionnement et au contrôle des unités de production d'énergie électrique en site isolé à partir des énergies renouvelables : Application au cas du Sénégal (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- [93] PABBULETI, B. & SOMLAL, J. (2020). A review on hybrid AC/DC microgrids: optimal sizing, stability control and energy management approaches. Journal of critical reviews.
- [94] CHABAUD, A. (2014). Micro-réseau intelligent pour la gestion des ressources énergétiques (Doctoral dissertation, Université de Perpignan Via Domitia).
- [95] LOUNICI, N., & DOUAIDI, S. (2017). Etude de l'intégration d'un site photovoltaïque dans un réseau Smart Grid (Doctoral dissertation, université de Bouira).
- [96] https://www.smartgrids-cre.fr/fileadmin/_processed_/a/9/csm_orga_fc872c9968.png
- [97] RIGO-MARIANI, R. (2014). *Méthodes de conception intégrée" dimensionnement-gestion" par optimisation d'un micro-réseau avec stockage* (Doctoral dissertation).
- [98] HAJAR, K. (2017). Coopérative énergétique intelligente (Doctoral dissertation, Université de technologie et des sciences appliquées Libano-française).
- [99] VAÏTCHEME.T M. (2019). Modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien (Doctoral dissertation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- [100] AOUCHICHE, N., CHEIKH, M. A., & MALEK, A. (2013). Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation. Revue des Energies Renouvelables, 16(3), 485-498.
- [101] PERRIN, V. (2016). Eolienne 2.0 du Gridlab : travail de bachelor : diplôme 2016 (Doctoral dissertation, Haute Ecole d'Ingénierie).
- [102] SEBAA, H. (2019). Contribution à l'optimisation de l'insertion des énergies renouvelables dans un réseau électrique intelligent (Doctoral dissertation).

- [103] MAZZI, Y., SASSI, H. B., ERRAHIMI, F., & ES-SBAI, N. (2019, April). State of charge estimation using extended kalman filter. In 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS) (pp. 1-6). IEEE.
- [104] ROUAS, R. (2018). Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [105] enviroearth.fr/domaines/systeme-hybride/
- [106] MADACI, B., CHENNI, R., & HEMSAS, K. E. (2018). Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs (Doctoral dissertation, جامعة الإخوة منتوري قسنطينة).
- [107] BELGHITRI, H. (2011). Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride Éolien-Photovoltaïque.
- [108] GUEZGOUZ, M. Perfectionnement et expertise des systèmes énergétiques complexes incorporant des sources renouvelables : Application au système hybride éolien-PV avec batteries sur un site national.
- [109] MAHAMMEDI, A. (2014). Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque (Doctoral dissertation).
- [110] CHOWDHURY, O. R., KIM, H. G., CHO, Y., SHIN, C., & PARK, J. (2015). Optimization of a hybrid renewable energy system with HOMER. In Advances in Computer Science and Ubiquitous Computing (pp. 93-99). Springer, Singapore.
- [111] BRIHMAT, F. (2012). L'Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [112] MECHEGAG.AM, Nait.O.N.2019.Conception d'un éco-quartier à Ain Sefra Université Saad Dahleb – Blida 1. Institut d'architecture et d'urbanisme.
- [113] BENARADJA. & BOUCHERIT H., (2014). Integrated management of pastoral resources in the area of Naama (Algeria). Algerian Review of Economic Development (ARED), 1(01), 11-11.
- [114] Monographie de la wilaya de Naama .2019.direction de la programmation et du suivi budgétaires de la wilaya de Naama
- [115] HAFFAF, A., LAKDJA, F., & ABDESLAM, D. O. (2019). Electrification d'une charge isolée d'agriculture par hybridation énergétique. Revue des Energies Renouvelables, 22(1), 1-17.
- [116] <https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/6/juillet/2019/ain-sefra/60560.html>
- [117] <http://data.cder.dz:81/>
- [118] GRTE. 2014. Structure du réseau de transport de l'électricité.
- [119] A .Hina Fathima. N. Prabakaran, K. Palanisamy, Akhtar Kalam, Saad Mekhilef and Jackson. J. Justo. Hybrid-Renewable Energy Systems in Microgrids :Integration, development and control